



TITLE:

リーフレタス生体重のモニタリングに関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

小田, 雅行

CITATION:

小田, 雅行. リーフレタス生体重のモニタリングに関する研究. 京都大学, 1988, 農学博士

ISSUE DATE:

1988-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6712>

RIGHT:

リーフレタス生体重のモニタリングに関する研究

小 田 雅 行

1988

新 制
展
520

京大附図

[illegible]

リーフレタス生体重のモニタリングに関する研究

目 次

結 論	1
第 1 章 生体重モニタリング装置の開発	10
結 言	10
第 1 節 リーフレタス生体重のモニタリングにおける 基本的養液条件の解明	11
第 1 項 共通の実験方法（第 2～4 項）	12
第 2 項 養液の濃度が生育に及ぼす影響	14
第 3 項 養液の pH が生育に及ぼす影響	15
第 4 項 養液の温度が生育に及ぼす影響	18
第 5 項 溶存酸素濃度が生育に及ぼす影響	20
第 6 項 考 察	27
第 2 節 吊下げ方式によるモデル装置の試作と特性評価	32
第 1 項 モデル装置（1 型）の構造	33
第 2 項 印加電圧源の種類がロードセルの出力に及ぼす影響	35
第 3 項 温度がロードセルの出力に及ぼす影響	35
第 4 項 連続使用が指示重量に及ぼす影響	37
第 5 項 考 察	37
第 3 節 生体重モニタリング装置の指示値と植物体の実測値との関係	41
第 1 項 測定部位について	41
第 2 項 根重の深さ別分布	42
第 3 項 考 察	44
第 4 節 支持方式による生体重モニタリング装置の改良	44
第 1 項 個体群生体重モニタリング装置（2 型）の試作	46
第 2 項 個体生体重モニタリング装置（3 型）の試作	49
第 3 項 考 察	51
第 5 節 総合考察	52
第 6 節 摘 要	54
第 2 章 生体重の長期計測と評価	56
結 言	56
第 1 節 活着までの生体重と根の活性の変化	57
第 1 項 定植直後の生体重の変化	57
第 2 項 根部形態および酸素吸収速度の変化	61
第 3 項 T/R および T T C 還元力の変化	61
第 4 項 考 察	67

第2節 収穫までの生体重の変化および他の形質との関係	67
第1項 生体重およびその増加率の推移	68
第2項 生体重と他の形質との関係	69
第3項 考 察	71
第3節 暗期における生体重の変化	76
第1項 暗期における生体重および呼吸の推移	77
第2項 明期の光強度が暗期の生体重に及ぼす影響	78
第3項 考 察	82
第4節 総合考察	85
第5節 摘 要	86
第3章 環境の変動に伴う生体重の一時的変化	89
緒 言	89
第1節 光の影響	90
第1項 明暗変化による生体重の変化	91
第2項 明暗変化による蒸散速度の変化	92
第3項 明暗変化による水欠差の変化	94
第4項 考 察	96
第2節 気温の影響	100
第1項 相対湿度一定下の気温変化が生体重に及ぼす影響	100
第2項 飽差一定下の気温変化が生体重に及ぼす影響	101
第3項 考 察	101
第3節 湿度および風の影響	104
第1項 湿度の変化が生体重、蒸散速度、葉温および光合成速度に及ぼす影響	105
第2項 風の有無が生体重に及ぼす影響	107
第3項 考 察	109
第4節 総合考察	111
第5節 摘 要	113
第4章 生体重のモニタリングによるリーフレタスの至適環境の推定	115
緒 言	115
第1節 至適気温の推定法の開発	117
第1項 相対湿度一定条件における至適気温	118
第2項 飽差一定条件における至適気温	122
第3項 考 察	122
第2節 生育段階別温度・光－生長反応の解析	127
第1項 生体重の増加率で見た生育段階別温度・光－生長反応	128
第2項 光合成速度で見た温度・光－生長反応	129
第3項 考 察	131

第3節 生体重の変化から推定した至適環境の栽培への適用	134
第1項 遮光がリーフレタスの生育に及ぼす影響（水耕）	134
第2項 加湿がリーフレタスの生育に及ぼす影響（水耕）	139
第3項 加湿および遮光がリーフレタスの生育に及ぼす影響（鉢栽培）	141
第4項 考 察	144
第4節 総合考察	148
第5節 摘 要	151
第5章 総 括	152
引用文献	157
Summary	168

考 論

野菜工場や高度な施設園芸では、環境制御のハードウェアはほぼ揃っており、ほとんど全ての環境制御が可能である。しかし、現実的には投資効率が低いため、これらの場所で栽培が可能な野菜は一部の果菜類や葉菜類に限られている。伊東（1984）は稼働中の野菜工場を調査して、直接生産費の約90%が電気代に使われており、その約70%を占めると推計される照明代の低減が最大の課題であると報告している。このため、低コストで生産性の高い照明方法および照明器具の開発が望まれ、池田ら（1984, 1987）は、発熱量が少なく発光効率の高い蛍光灯の近接照射によって照明電力が低減されることを明らかにした。更に池田ら（1985）、橋本ら（1987）はパルス照射光源を開発して省電力栽培の可能性を見だし、易ら（1987）はそれが光合成速度に及ぼす影響を調べて、使用電力の節減に有効であることを確かめた。

これらの施設では、かなり自由な環境制御が可能である。したがって、新しい栽培ソフトウェアの開発によって生育が飛躍的に促進されれば、投資効率が改善される可能性がある。その一つは、補光である。明期間の補光については、中島・大野（1985）はレタスに対して生長促進効果を認めたが、伊東（1985a）はさらに検討の余地があるとしている。また、夜間の補光については、岡部（1985）はサラダナ、Wurrら（1986）は結球レタス、星ら（1986）はハウレンソウでその効果を認めた。日長について、Koontz・Prince（1986）は、それが長いほど、ま

た、光エネルギーの総量が同じならば弱光でも日長が長いほどリーフレタスの生長量が多いことから、連続照明による生育促進の可能性を示した。

一般的な栽培管理の観点からも、高度に発達した栽培ハードウェアを使いこなせる精密な栽培ソフトウェアが無いので、その開発が望まれている。野菜工場などの生産現場では、生育速度の最高速化によって施設を効率的に利用しようとして生産者自らが経験と勘による試行錯誤を繰り返し、栽培ソフトウェアの開発を行いながら運営しているのが実態である。しかし、作物の最適環境は、生育段階や各種の環境要因によって異なり、その組み合わせは膨大であるため、従来の方法では作物の最適環境を解明することが困難な状況にある。すなわち、環境情報と比較して生体情報の連続的な計測は難しいので、作物の生育調査は手作業に頼っている。このような解体調査では、生育段階ごとに多くの個体が必要となり、測定誤差を解消するためにも一層多くの個体数を確保しなければならない。したがって、栽培や調査の場所と労力の面から制約を受け、実際の調査間隔は数日から数週間になり、環境要因の膨大な組合せを処理することが物理的に不可能といえる。

一方、電気計測技術の発達によって環境情報は秒単位で収集できるようになっており、環境情報と生体情報の収集速度には益々大きな差が生じている。

このような状況下で、近年発達の著しいセンサーやコンピュータ技術の活用により生体情報を高精度・非破壊、できれば連続的に測定し、生育状態や生長量を簡易・迅速に判断できるようにしようとする研究が増えてきた。

生理状態の生体情報については多くの研究がある。Marshall (1958)、桜谷 (1982) は、蒸散流量が茎表面の 2 点間を伝わる熱の伝達速度で測定できることを明らかにし、北野・江口 (1986) は、それを改良してオンライン・リアルタイムの計測ができる方法を示した。また、Namkenら (1969) および Klepperら (1971) は、差動トランスを用いてワタの茎径を連続測定するとともに水ポテンシャルを測定した結果から、茎径の測定による作物水分状態の推定の可能性を示した。Huck・Klepper (1977) は、茎径の変化を水ポテンシャルとして連続的に表示するためのコンピュータ処理法を検討し、実測値に近い水ポテンシャル値を得た。長野・島地 (1976) は、茎径の変化と作物の水分状態の関係を明確にした。関山ら (1978, 1980, 1982) および羽生ら (1984, 1985, 1987) は、茎径と他の生体情報を同時計測して茎径の変化と葉温、葉の伸長、茎葉部における静電容量の変化、生体組織間の電位差および蒸散流量との関係を明らかにするとともに、実際の栽培における生育環境条件の評価手法として茎径が利用できることを示した。

水分状態の計測部位を葉にまで広げることのできる他の非破壊測定法として、静電容量の利用も研究された。橋本ら (1974) はキュウリの茎、関山ら (1980) はポプラ幼木の茎および葉の水分状態が静電容量の変化によって検出できることを明らかにした。さらに、橋本ら (1978) は、この指標が湿度制御のための生体内水分の予測に利用できる可能性を示唆した。

茎径や静電容量の変化にみられる作物の水分状態を水ポテンシャルとして、直

接に非破壊計測することもできる。Schafferら（1986）および Mcburney・

Costigen（1987）は、葉の一部に装着できる小型のサイクロメーターによって水ポテンシャルを、Heathcoteら（1979）はストレインゲージを組み入れた装置によって葉肉細胞の膨圧を非破壊測定できることをそれぞれ明らかにした。

葉温も生育状態を表す優れた指標である。橋本ら（1979a, 1979b, 1981）は、葉温の画像処理によって葉温のダイナミックな変化を視覚・数値化し、これと空気湿度との関係を明らかにするとともに、葉温をモニターとする植物生育の最適制御を検討した。この結果から、葉温振動を減衰させるように加湿制御してやるとキュウリの乾物生長が10日間で通常の2.7倍になることを明らかにした。大政ら（1981）は、二酸化イオウ、二酸化窒素およびオゾンに暴露した場合のロシアヒマワリの葉温分布と1日後の可視害症状を比較した結果から、葉温が汚染ガス害の指標になり得ることを明らかにした。このほか、井上（1986, 1987a, 1987b）は自然条件における作物群落のキャノピー温度の画像解析を行い、これと葉温、蒸散速度との関係を解析して、作物群落の生産機能および生育状態の非破壊非接触診断に作物群落のキャノピー温度を利用できる可能性を示した。

また、クロロフィルから発生する蛍光も光合成の障害を表す非破壊非接触の優れた指標である。Schreiberら（1978）は、インゲンマメの葉に対するオゾンの障害が可視症状の発生する20時間以上も前に蛍光によって検定できることを、Smille・Hetherington（1983）はキュウリ、キャベツなどの環境ストレスによる傷害のモニターにクロロフィルから発生する蛍光を利用できることを明らかにし

た。さらに、Omasa ら (1987) は二酸化イオウによるヒマワリ葉のガス障害を可視症状の発生する以前に検定した。

生体組織間の電位差についても、関山ら (1982) , 三輪ら (1987) によって環境応答が調べられているが、生育状態と生体組織間の電位差との関係は必ずしも明かでない。

分光反射率を利用した研究も始められている。Eguchiら (1979) は、キュウリの健全葉とり病葉とで分光反射率が異なり、650～690nm (R) および 800～1000nm (I) の波長域における反射率の比 (r_I / r_R) によって両者を効率的に区分できることを明かにした。Ahlrichs (1983) は中赤外光の反射率が植物の水分含量と比例関係にあること、Shibayama・Akiyama (1986b) は赤紫および近赤外光の分光反射係数から水稻葉身の窒素量を非接触計測できる可能性を示唆した。

一方、生長量の生体情報は、生理状態のそれと比較して収集が困難であり、モニタリングの手法が十分には開発されていないのが現状である。

その中では、航空機や人工衛星によるリモートセンシングに関する研究が最も進んでおり、地上対象物の分光反射特性を利用した植物体現存量や生育状態の遠隔測定法が検討されている。Aokiら (1986) および青木ら (1986) は分光反射特性を利用してクロロフィル含量と葉面積指数の推定を試み、Shibayama・Akiyama (1986b) はクロロフィル含量×葉面積指数、すなわち単位土地面積当りクロロフィル量の推定に有効であることを明らかにした。また、Shibayama・Munakata (1986a, 1986b, 1986c) , Shibayamaら (1986) は、分光反射率を利用して水稻群

落の乾物重、生体重および粗もみ収量を推定するとともに、作物個体群の反射スペクトルを圃場内に踏み込むことなく迅速に測定する装置を開発した。

植物体の部分生長のモニタリング法についても若干の研究がある。

茎については、嶋田・内藤（1975）がトマト、キュウリなどを対象として、差動トランスを利用した茎長の伸長測定装置を開発した。

葉については、その伸長測定装置を開発し、イネ科作物を対象として計測した事例がいくつかある。Gallagher ら（1976）は圃場で使える葉の伸長率測定装置を開発し、Gallagher・Biscoe（1979）はこれに改良を加えてオオムギ葉の水ポテンシャルとその伸長率が比例関係にあることを明らかにした。さらに、Gallagherら（1979）は、同様の装置によりコムギの葉の伸長が約0℃で止まり、強光が蒸散を増して伸長率を低下させることを明らかにした。このほか、Christ（1978a）、Stoddartら（1986）、Stoddart・Lloyd（1986）、Cutlerら（1980）は、各種の環境条件における生長反応を葉伸長の変化を指標として解析している。

果実については、Hole・Scott（1984）が差動トランスを用いたエンドウ果実の伸長計を、高辻（1982）が固有振動数の解析理論を応用したピーマンの重量計を開発した。

根については、Tanimoto・Watanabe（1986）は水耕法の導入により根への接触を少なくした自動伸長記録装置を開発して、養液のオーキシン濃度やpHと根の伸長との関係を検討した。Omasaら（1985）およびHugo・Bottomley（1987）は、NMRイメージを利用して根系の非破壊計測法を開発した。

また、植物の投影面積を利用した生長量の推定も試みられている。Matsui・Eguchi (1976) および Eguchi・Matsui (1977) は、CCDカメラを用いていろいろな角度からみたキュウリの投影面積を撮影して、コンピュータによるオンライン計測を行い、投影面積と生長との関係を解析した。さらに、Eguchi・Matsui (1978) は、投影面積による作物生育状態のモニタリングが実際栽培に応用し得ることを明らかにした。小田ら (1987) は、これを簡易化して作物上部からの投影面積だけで非結球のレタスの生体重を推計した。

生体重についても若干の研究がある。高辻ら (1978) は水耕のレタスをさおで支え、支点の反対側に取り付けた歪ゲージの出力を利用して生体重の非破壊計測を行った。しかし、このさお支点による方法では植物の姿勢の影響が考慮されていないことから、玉木 (1983, 1984) は歪ゲージの数を増やして精度を向上させるとともに、群落状態の重量生長が連続測定できるようにした。このほか、Mccaig (1986) は切除葉の生体重の短期的変化を計測するために、歪ゲージとコンピュータを組み合わせたシステムを開発した。しかし、生体重のモニタリングに関しては研究が少なく、やっと若干の計測法と計測事例が報告されるようになったばかりである。計測手法の確立、生体重によって得られる情報の解析などに不可欠な生体重の環境応答に関する研究は特に少ないのが現状である。

生体重は、基本的な生長量の一つであり、水分の多い野菜、とくに葉菜類の地上部はそのまま収穫重量に相当する。したがって、野菜では生体重のモニタリン

グ法の開発によって、生態反応の研究の進展並びに栽培管理のモニターとしての応用が期待される。作物情報の収集が高速・高精度化することにより、これまで事例的であった環境条件と作物生長反応が体系化、データベース化され、これによる作物生長の環境応答のシミュレーション、新栽培法の開発、コンピュータによる最適環境制御などが可能になると考えられる。

本論文は、野菜の収量並びに品質に対する影響の大きい植物体内水分を含む生体重の変化を指標とする野菜の生長解析の可能性と限界を明らかにする目的で実施した。

このため、第1章では、リーフレタス水耕栽培における基本的な養液条件を解明するとともに、水耕装置とロードセルを組み合わせた生体重のモニタリング装置を試作して、その特性を明らかにした。第2章では、同装置に作物を定植して1作期間栽培し、作物の生体重が正しく計測されているか否かを生理的な反応の面から確かめるとともに、生体重と他の形質との関係を明らかにした。第3章では、同装置を使って環境条件の変化による生体重の一時的な変動を明らかにし、生体重をモニタリングする上での留意事項を検討した。第4章では、生体重の増加率でみたリーフレタスの至適環境と光合成速度でみたそれとを比較し、生体重のモニタリングによる至適環境の推定の可能性を検討した。

謝 辞

本論文の作成に当り、京都大学農学部浅平 端教授の懇切な御指導と御校閲を賜った。ここに記して深甚なる謝意を表する。

論文執筆の端緒は、京都府立大学農学部並木隆和教授並びに千葉大学園芸学部古在豊樹助教授が、御勧誘・激励下さったことにある。御蔭で今日に至った。また、野菜・茶業試験場場長山川邦夫博士には英文摘要の御校閲を賜った。ここに併せて謝意を表する。

研究の実施に当たっては、野菜・茶業試験場生理生態部前部長太田保夫博士、現部長安井秀夫博士、同部前ストレス耐性研究室長星野和生博士、生殖生理研究室長桂 直樹博士には適切な御助言を賜った。ストレス耐性研究室室長長岡正昭博士、野中正義主任研究官（現久留米支場）、青木 智博士をはじめ野菜・茶業試験場の多くの皆様から暖かい御支援を頂いた。また、宮城県園芸試験場の本多信寛技士には実験の遂行に多大の御協力を頂いた。謹んで御礼申し上げる。

なお、本研究の大部分は、農林水産省一般別枠研究「農業生産管理システム構築のための情報処理技術の開発」の一環として実施し、研究に必要な予算的な御支援を頂いた。当該プロジェクトの関係諸氏に深謝する次第である。

第 1 章 生体重モニタリング装置の開発

緒 言

近年に至って作物生体計測，とりわけ非破壊連続的な生体情報のモニタリングに関心が集まり，各種の生体計測手法が開発されつつある．これまでの研究は，茎計変化（Namkenら，1969；Klepperら，1971；長野・島地，1976；Huck・Klepper，1977；関山ら，1978，1980；羽生ら，1984，1985，1987；桜谷，1982；北野・江口，1986）や葉温変化（橋本ら，1979a，1979b，1981；大政ら，1981；井上ら，1986，1987a，1987b）による植物の水分ストレス状態の推定などの生理状態をモニタリングするものがほとんどで，生長量に関しては，茎（鴨田・内藤，1975），葉（Gallagherら，1976，1979；Gallagher・Bisco，1979），果実（Hole・Scott，1984），根（Tanimoto・Watanabe，1986）などの部分的な伸長のモニタリングに偏している．したがって，植物の全体的な生長をモニタリングの対象とした研究は少ない．

植物の生長を知る上で，生体重は最も基本的な計測量である．しかし，作物生長の研究が穀物などへの熱量の固定を目的としたいわゆる物質生産の効率向上を目指して行われてきており，その上生体重は測定時の環境条件などによって測定値が変動し易いことなどから，大部分を水が占める生体重そのものが研究の対象とされることは稀であった．

ところが、野菜は熱量の摂取を目的とせず、収穫物の大部分を占める水分が生鮮食品としての収量と品質の上で重要な役割を担っている。したがって、生体重のモニタリング技術を完成し、生体重がもつ情報の特性を明らかにすることは、野菜の栽培管理への応用に役立つものと考えられる。

このため、本章では生体重の微細な変化を非破壊かつ連続的に計測できる生体重モニタリング装置を開発した結果を記述する。第1節では、当該装置の構成要素である水耕装置の具備すべき機能をリーフレタスの生育の面から検討する。第2節では、ロードセルの出力の安定性と出力値が示す作物の部位を明らかにする。第3節では、これらの結果を踏まえて開発した個体群生体重のモニタリング装置を、第4節では、これに改良を加えて完成した実験用の装置について説明する。

第1節 リーフレタス生体重のモニタリングにおける基本的養液条件の解明

これまでに開発された生体重の非破壊測定装置（高辻ら1978；玉木1983，1984）は、いずれも水耕を必須の条件としている。ここで開発しようとする生体重のモニタリング装置も同様である。しかし、供試するリーフレタスについては具体的な養液管理法に関する研究が少ないのが現状である。すなわち、従来行われてきたレタスの水耕に関する研究は、ヘッドレタス（Head lettuce）の中のクリスピーヘッドレタス（Crisp head type）とバターヘッドレタス（別名サラダナ，Butter head type）を材料としたものがほとんどであり、リーフレタス（Leaf

lettuce) のそれは少ない。これらは、それぞれレタスの一タイプに属するものの、形態や光合成特性の異なることが明らかになっている(小田, 1985)。したがって、リーフレタスの生育特性を知る上でクリスピーヘッドレタスやバターヘッドレタスの生育特性は参考程度にしか役立たない。

そこで、リーフレタスの水耕における養液管理の基本的な制御目標値を定める目的で、養液の濃度、pHおよび温度が生育に及ぼす影響を検討するとともに、生長にともなう溶存酸素濃度の低下からみて最小限必要な通気量を推定する。

第1項 共通の実験方法(第2～4項)

第2～4項の実験では、品種‘グランドラビッド’の催芽種子をもみがらくん炭には種した。苗は、25×25×30mmのウレタンキューブにはさんで厚さ18mmの発泡スチロール製定植板に株間15cmで各区12株ずつ定植した。養液は、縦、横および深さがそれぞれ40、60cmおよび20cmの容器に19cmまで満たし、小型エアープンプで常時通気した。養液は大塚ハウス肥料のA処方を用いて調製し、Table 1の養分を含む場合を1単位濃度とした。

実験は、床面積9m²に対し陽光ランプ(400w)22灯および水銀ランプ(1kw)6灯を配した野菜・茶業試験場の人工気象室で行った。育苗および栽培期間中の地上部環境は、光量子密度が342μmol m⁻² s⁻¹(400–700nm)、気温が明暗期とも20±0.5℃、相対湿度が70(明期)～85%(暗期)であった。日長は、第2項および第4項の実験では10時間、第3項の実験では18時間であった。

**Table 1. Concentration of elements
in the standard nutrient
solution**

Element	Concentration (ppm)
N	260.0
P ₂ O ₅	120.0
K ₂ O	345.0
CaO	230.0
MgO	75.0
B ₂ O ₃	1.5
Fe	2.7
MnO	1.5

第2および3項の実験では、毎日水を加えて水位をほぼ一定にし、第4項の実験では補水をしなかった。

栽培期間中の養液の電気伝導度（EC）およびpHは、数日間隔で測定した。これらの値が設定値と異なった場合、ECは水または濃厚養液を、pHは硫酸または水酸化ナトリウムを加えて調整した。ECは、25℃標準値に補正した。

葉数は、葉長1 cm以上の葉を数えた。乾物重は、80℃で3日間乾燥してから秤量した。

第2項 養液の濃度が生育に及ぼす影響

実験方法

は種後12日目に本葉1枚展開時の苗を0.5, 1.0, 1.5, 2.0および2.5単位濃度の処理区に定植した。このときの各区のECは、それぞれ1.5, 2.4, 3.2, 4.0および4.9 mS cm^{-1} であった。6～8日ごとにECおよびpHを測定し、ECは設定した処理濃度に、pHは5.5～6.5に調節した。ECはどの区も時間の経過とともに低下する傾向を示したが、調整の結果、栽培期間中の各区のECは、それぞれ1.4～1.5, 2.0～2.5, 3.0～3.5, 3.7～4.3および4.4～5.2 mS cm^{-1} の範囲にあった。また、定植時の各区のpHは、それぞれ6.6, 6.3, 6.0, 5.8および5.6で、定植後21日目までは比較的安定して推移し、各区で6.0～7.0, 5.8～6.5, 5.7～6.2, 5.7～6.0および5.5～5.8の範囲にあった。しかし、その後生育が旺盛になるに伴いpHは著しく低下して、定植後28日目の各区のpHは5.3, 4.7, 3.6, 5.2および5.4となった。

生育調査は、定植後28日目に行った。

実験結果

養液濃度がリーフレタスの生育に及ぼす影響をTable 2に示した。葉数、葉長および茎長は、1.5および2.0単位区、葉幅、地上部生体重および根長は1.5および2.0単位区、葉幅、地上部生体重および根長は1.5単位区、根乾物重は2.0単位区が優れた。葉長／葉幅は、2.5単位区でやや小さかったが、他の区間の差はほとんどなかった。地上部の乾物率は、1.5単位区が最も低く、2.5単位区が最も高かった。

第3項 養液のpHが生育に及ぼす影響

実験方法

は種後5日目に子葉展開時の苗を1.5単位濃度養液に定植した。は種後9日目にpHを4, 5, 6, 7および8に調整した。栽培期間中の各区のpHは、3～4日ごとに測定し、設定したpHに調整した。この結果、定植後14日目までの各区のpHは、3.8～4.6, 4.6～5.6, 5.9～6.3, 6.6～7.3および7.9～8.0の範囲で推移した。しかし、その後3日間のpHの低下は大きく、定植後17日目には各区のpHが3.9, 4.0, 4.1, 6.6および7.8になった。栽培期間中のECは、全区で2.9～3.2 mS cm^{-1} の範囲にあった。生育調査は、定植後17日目に行った。

実験結果

養液のpHがリーフレタスの生育に及ぼす影響をTable 3に示した。地上部の生

Table 2. Effect of concentration of nutrient solution on the growth of leaf lettuce in solution culture.

Conc. ^a	No. of leaf ^b	Maximum leaf			Stem length (cm)	Top		Root	
		<i>L</i> (cm)	<i>W</i> (cm)	<i>L/W</i>		<i>FW</i> (g)	<i>DM</i> rate (%)	<i>L</i> (cm)	<i>DM</i> (g)
0.5	13	15.0	14.0	1.07	1.5	31.1	5.3	31	0.29
1.0	14	15.0	13.3	1.13	1.5	34.3	5.2	34	0.30
1.5	15	16.3	15.0	1.09	1.6	47.3	5.0	38	0.39
2.0	15	16.3	14.7	1.11	1.6	45.5	5.5	34	0.40
2.5	13	13.3	13.0	1.02	1.3	25.1	6.7	30	0.26

Average of 12 plants grown in a growth chamber. The condition was $342 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (day length, 10 h), $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, and 70~85%Rh.

L, length; *W*, width; *FW*, fresh weight; *DM*, dry matter weight.

^a Magnitude of the standard solution.

^b Leaves that were longer than 1 cm.

Table 3. Effect of pH of nutrient solution on the growth of leaf lettuce in solution culuture.

pH	No. of leaf	Top			Root
		FW (g)	DM (g)	DM rate (%)	DM (g)
4	8	9.4	0.70	7.5	0.12
5	9	15.2	0.96	6.3	0.21
6	9	19.2	1.23	6.4	0.25
7	8	10.6	0.72	7.4	0.24
8	4	0.3	0.03	10.4	0.01

Average of 12 plants grown in a growth chamber.

The condition was $342 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (day length, 10 h), $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, and 70~85%Rh.

FW, fresh weight; DM, dry matter weight.

体重および乾物重はpH6区が最も大きく、次いでpH5, 7, 4区の順となり、pH8区は最も小さかった。根乾物重は、pH6区が最も大きく、次いでpH7, 5, 4区の順となり、pH8区は最も小さかった。また、地上部の乾物率は、pH5および6区が最も低く、pH7および4区の順となり、pH8区は最も高かった。

第4項 養液の温度が生育に及ぼす影響

実験方法

1.5 単位濃度の養液を10, 15, 20, 25, 30および35±0.5 °Cに設定した。は種後9日目に本葉展開の苗を定植した。各区のECは、定植時の3.2 mS cm⁻¹から全区とも高くなり、定植後29日目には、それぞれ3.6, 3.7, 3.7, 4.2および4.2 mS cm⁻¹になった。pHは、3～7日ごとに測定して6.2に調整した。この結果、定植後19日までの各区のpHは、6.3～6.7, 5.7～6.5, 5.3～6.3, 5.3～6.4, 5.8～6.5および6.0～6.5の範囲で推移した。しかし、その後の20, 25および30 °C区におけるpHの低下は急速であったので、調整にもかかわらず定植後26日目が、5.2, 4.3および4.6, 29日目が4.4, 4.0および4.3になった。その他の区では定植後19日までに変動したpHの範囲内で引続き推移した。生育調査は、定植後29日目に行った。このとき、平均的な生育を示した個体の3, 6, 9, 12葉目および茎を写真撮影した。

実験結果

養液温度がリーフレタスの生育に及ぼす影響をTable 4に示した。葉数、葉長、

Table 4. Effect of temperature of nutrient solution on the growth of leaf lettuce in solution culture.

Temp.	No. of leaf ^a	Maximum leaf			Top		Root	
		<i>L</i> (cm)	<i>W</i> (cm)	<i>L/W</i>	<i>FW</i> (g)	<i>DM</i> rate (%)	<i>L</i> (cm)	<i>DM</i> (g)
10	11	10.0	9.8	1.02	19.4	5.4	45	0.25
15	12	14.0	12.0	1.17	24.8	5.7	31	0.26
20	14	18.0	15.0	1.20	50.1	4.4	38	0.28
25	19	22.0	17.0	1.29	69.0	4.9	40	0.35
30	17	20.0	15.2	1.32	56.9	4.7	31	0.31
35	9	7.2	5.4	1.33	4.4	7.7	5	0.07

Average of 12 plants grown in a growth chamber. The condition was $342 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (day length, 10 h), $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, and 70~85%Rh.

L, length; *W*, width; *FW*, fresh weight; *DM*, dry matter weight.

^a Magnitude of the standard solution.

葉幅，地上部生体重および根乾物重は，養液温度が25℃の区で最も大きく，次いで30，20，15，10℃区の順となり，35℃区は最も小さかった．根長は，10℃区で最も長く，35℃区で最も短かったが，この間の区には明らかな傾向がなかった．葉長／葉幅は，養液温度が高いほど大きくなった．地上部の乾物率は，30℃までは養液温度が高いほど低くなる傾向にあったが，35℃では高かった．

養液温度が葉の形状に及ぼす影響をFig. 1に示した．葉の大きさは，25℃区で最も大きく，次いで30℃区となり，35℃区では最も小さかった．葉色は，30℃区でやや濃かったが，養液温度との関係は明らかでなかった．

第5項 溶存酸素濃度が生育に及ぼす影響

実験方法

品種‘グランドラビッド’の催芽種子をもみがらくん炭に播種し，子葉が展開した8日後に水耕養液に各区とも24株ずつ定植した．条間は15cmで，株間は定植時が7.5cm，定植後19日に12株を生育調査した後が15cmであった．培養液は，大塚ハウス肥料の1及び2号を組み合わせた1単位濃度とし，縦，横，高さが60, 40, 20 cmの容器に42 l入れた．通気は，小型エアーポンプで送出し，エアーストーンで小さな気泡にして行った．通気量は，0, 50, 500, 2500および7500 ml min⁻¹とした．実験は，気温20±0.5℃，相対湿度70～85%，光量子密度406 μmol m⁻² s⁻¹，日長16時間の環境制御室内で行った．栽培期間中の培養液のpHは3.5～6.3の範囲にあって生育が旺盛な区ほど低下が著しく，ECは1.9～2.5 mS cm⁻¹の範囲にあった．

根の酸素吸収速度は、地際で切り取った根と酸素飽和脱塩水を入れた100 ml容
広口びんに酸素電極を貫通したゴム栓で蓋をし、マグネチックスターラで一定の
流速を与え、溶存酸素濃度の低下速度から算出した。マグネチックスターラの上
にステンレス製金網で塊を作り、根が脱落するのを防止した。広口びんの周囲に

一定温度の水を

実験結果

消費量を共に

に示した。い

度は消費量が少

7500 ml min⁻¹

であった。

消費量を共に

および28日とも

7500 ml min⁻¹ではやや劣った。

温度(500 ml min⁻¹)の影響をFig. 2に示した。
無通気区では短い根が生育している根に根毛の密
生が観察された。この根は生育している根毛に伸びた。

生育段階別の根の酸素吸収速度の推移をTable 7に示した。根の酸素吸収速度
は、4.7 ~ 6.4 mg l⁻¹ h⁻¹の範囲で変化した。生育段階との間に一定の関
係は認められなかった。しかし、根量の増大に伴って1個体当りの酸素吸収量は

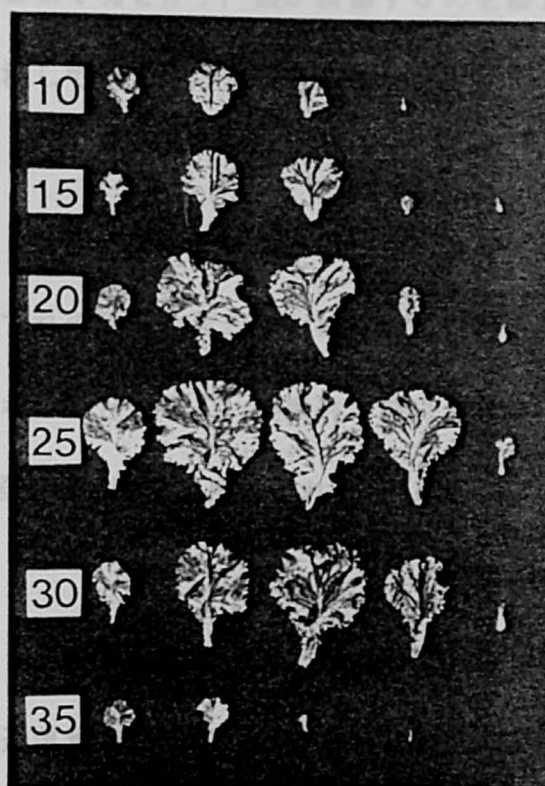


Fig. 1. Effect of temperature of nutrient

solution on the configuration of leaf

lettuce. Figures show the treated

temperature(°C). Third, sixth, ninth,

twelveth and fifteenth leaf are from

left to right. Right ends are stems.

根の酸素吸収速度は、地際で切り採った根と酸素飽和脱塩水を入れた100 ml容
広口びんに酸素電極を貫通したゴム栓で蓋をし、マグネチックスターラで一定の
流速を与え、溶存酸素濃度の低下速度から算出した。マグネチックスターラの上
にステンレス製金網で境を作り、根が損傷するのを防止した。広口びんの周囲に
一定温度の水を流してびん内の温度を制御した。

実験結果

通気量を異にしてリーフレタスを水耕した場合の溶存酸素濃度の推移をTable
5に示した。いずれの区も生育が進むに連れて溶存酸素濃度が低下した。その程
度は通気量が少ないほど大きく、実験終了時における 0, 50, 500, 2500 および
7500 ml min⁻¹区の溶存酸素濃度はそれぞれ 1.0, 3.5, 6.1, 7.3 および8.0 ppm
であった。

通気量を異にして水耕したリーフレタスの生育をTable 6に示した。定植後19
および28日とも通気量 2500 ml min⁻¹までは通気量が多いほど生育が優れたが、
7500 ml min⁻¹ではやや劣った。

通気 (500 ml min⁻¹) がリーフレタス根の形態に及ぼす影響をFig. 2に示した。
無通気区では短い根が水面上部に集中し、特に水面に浮遊している根に根毛の密
生が観察された。これに対し、通気区では長い根が水中に伸びた。

生育段階別の根の酸素吸収速度の推移をTable 7に示した。根の酸素吸収速度
は、4.7 ~ 8.4 mg g DW⁻¹ h⁻¹の範囲で変化した。生育段階との間に一定の関
係は認められなかった。しかし、根量の増大に伴って1個体当りの酸素吸収量は

Table 5. Changes of dissolved oxygen concentration in nutrient solution while leaf lettuces were growing.

Aeration (ml min ⁻¹)	Conc. of O ₂ (ppm)				
	0 ^a	7	19	22	28
0	8.6	7.5	1.6	1.3	1.0
50	8.7	7.6	6.7	5.9	3.5
500	8.8	8.7	8.2	7.9	6.1
2500	8.7	8.8	8.6	8.3	7.3
7500	8.7	8.7	8.6	8.5	8.0

^a Days after planting.

Table 6. Effect of aeration into the nutrient solution on the growth of leaf lettuce.

Days after Planting	Aeration (ml min ⁻¹)	Fresh weight (g)				Dry weight (g)		
		leaf	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
19	0	7.0	5.6	0.2	2.3	0.30	0.01	0.09
	50	7.3	8.1	0.3	2.9	0.48	0.03	0.12
	500	8.0	11.0	0.5	2.8	0.58	0.03	0.13
	2500	8.1	14.5	0.7	3.8	0.73	0.05	0.16
	7500	8.0	12.7	0.5	3.7	0.63	0.03	0.14
28	0	17.5	61.6	3.5	10.2	4.82	0.42	0.53
	50	17.0	59.7	2.8	14.7	3.83	0.33	0.56
	500	20.5	83.6	5.8	18.5	4.81	0.44	0.62
	2500	18.5	115.3	11.5	20.9	4.88	0.60	0.83
	7500	18.5	99.1	10.0	20.2	4.14	0.55	0.62



Fig.2. Effect of aeration into the nutrient solution on the configuration of the root in leaf lettuce. Figures show the rate of aeration(ml min^{-1}).

Table 7. Absorption of oxygen by the root of leaf lettuce(20°C).

Days after planting	Number of leaf	Dry weight		Rate of O ₂ absorption (mg gDW ⁻¹ h ⁻¹)	Quantity of O ₂ absorption (mg plant ⁻¹ h ⁻¹)
		Top(g)	Root(mg)		
2	2	0.02	8	6.9	0.06
6	4	0.11	25	7.2	0.18
12	8	0.49	119	7.0	0.83
15	10	1.13	241	8.4	2.02
23	18	5.77	826	4.7	3.88

著しく増大した。

通気および無通気条件で栽培したリーフレタスにおける養液温度と根の酸素吸収速度との関係をFig. 3に示した。酸素吸収速度は、20℃以下は前歴期間中に通気した作物と無通気のそれとの間に差がなかったが、25℃以上では無通気の方が大きくなった。前歴に通気した区および無通気区の Q_{10} は、20℃までがそれぞれ3.3および2.8、30℃までが1.7および6.3であった。

第6項 考察

本実験は人工光下で行った。Hammerら(1978)は、計測・制御法を標準化すれば、光源や環境制御室の構造が異なる場合の作物の生長速度の違いは、同一環境制御室で繰り返して栽培した場合のそれよりも小さいことを明らかにした。しかし、近年の植物工場への関心の高まりに伴って、その後も光源の分光特性と作物の生育との関係が研究されている。Cathyら(1978)、Krizek・Ormrod(1980)、Tibbitsら(1983)、伊東(1985b)およびKoontzら(1987)は、光源の分光特性の差異によって作物の生育が異なると報告している。本実験の場合、植物育成用光源としてわが国で最も広く使用されている(稲田, 1984)陽光ランプ(メタルハライドランプ)を主光源として用いたので、リーフレタスの形態形成上、問題の少ない光条件であったと考えられる。

供試養液は、野菜一般の養液栽培で実用されている市販品を用いた。1単位濃度の本養液は、養液栽培の基本的養液として知られる園芸試験場処方標準濃度

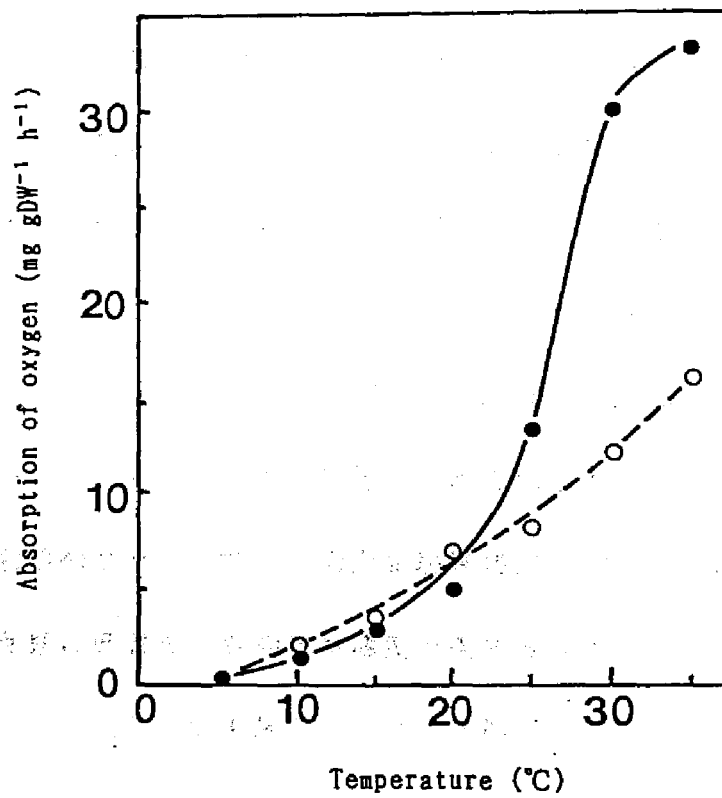


Fig. 3. Effect of temperature of nutrient solution on the absorption of oxygen by the root of leaf lettuce. ---, unaerated ; —, aerated.

養液に類似した成分を含んでいる。

第2項の実験では、蒸散による減水量を毎日補水して1個体当りの養液量を4lに保った。養液濃度は、作物による無機養分の吸収によって低下したが、その程度は特に生育後期に著しかった。そこで、定植後21日目にECを調節した結果、各区のECは、一時的に変動したが、設定値の近傍で推移した。

pHは、養液濃度が高いほど低かったが、この差異は後述の好適pHの範囲に含まれた。また、実験終了時におけるpHは、pH6区で著しく低下したが、生育はむしろ良好であった。したがって、pHの変動による影響は少なかったと考えられる。

このような養液条件で栽培したリーフレタスの生育は、1.5単位濃度が最も優れ、2.0単位濃度がこれに次いだ。また、葉形／葉幅でみた徒長傾向、茎長でみた抽たいに対する養液濃度の影響は認められなかった。

- ・ 施設栽培のサラダナでは、園芸試験場処方の0.5～1.5単位濃度を好適な範囲とし、夏期は低濃度、冬期は高濃度が適する（板木ら，1984）とされている。本実験は、人工照明下で実施しており、冬期に近い光条件であったことが好適な養液濃度を高くしたと考えられる。したがって、 $342\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 以下の光条件でリーフレタスを養液栽培する場合の好適な養液濃度は、これまでにサラダナなどの施設栽培で明らかにされた好適範囲の上限に近い1.5～2.0単位濃度と考えられる。

第3項の実験は、pHの変化が大きかったので、定植後21日で終了した。これまでに、ECはpHと比較して変化が遅く、徐々に変化した場合には許容範囲の広いこ

とが分かっているので、処理の対象であるpHだけを測定した。pHの調整に際して水酸化ナトリウム溶液を使用したところ、pH7区では少し、8区では著しく養液が白濁した。この白濁は、pHの調整に使った水酸化ナトリウム溶液の影響で鉄が沈殿したことに起因すると考えられる。栽培期間中のpHは、全区とも定植後14日まで設定値の近傍で推移したが、17日目にはpH5および6区で著しく低下した。しかし、両区の生育が優れたことから、この影響は小さかったと考えられる。

このようなpH条件で栽培したリーフレタスは、pH6区の生育が最も優れた。地上部の乾物率は、pH8区で特に高く、葉の堅いことが観察されたが、それ以外の区では品質に問題はなかった。施設におけるレタスの養液栽培では、養液の好適なpHは、5.5～6.5と言われる（山崎，1982）が、人工光下で行った本実験結果もほぼ同様であった。ただし、生育速度を高めることが望まれている野菜工場での栽培や生育状態の実用的なモニタリングでは、更に、最適pHの検索とその維持管理法のひとつとして養液の成分組成についても検討が必要である。

第4項の実験では、養液の処理温度を0.5℃の誤差で管理した。養液のECは、養液が減少しても補水しなかったため、次第に上昇した。しかし、栽培終了時のECが2単位濃度のそれに近かったので、生育に対する影響は少なかったと考えられる。ECの上昇からは、リーフレタスによる水の吸水と比較して養分の吸収が少なく、養液が濃縮されたことが分かる。しかし、蒸散に伴う吸水量は、空気湿度、風速、光強度などによって変化し、養分の吸収は蒸散が少ない場合も能動吸収が可能なことから、栽培条件によってはECの上昇の程度を小さくできる。また、実

験1のように補水による濃度低下が可能なので、先述の好適濃度を維持することは、實際上困難でない。

pHは、栽培終了直前の定植後26および29日に第3項で明らかにした好適範囲を下回る区ができた。しかし、pH低下の著しい区ほど生育が優れたので、この影響も小さかったと考えられる。逆に、生育が良好で養液の吸収が多いほどpHの変化が大きいとすれば、養液の成分割合が不適当なのであろう。野菜一般の養液栽培に開発された園芸試験場処方では、その組成が個々の野菜にとっては必ずしも最適でないとして、野菜ごとの養液組成が検討されている現状を裏づける結果となった。

このような養液温度条件で栽培したリーフレタスの初期生育は、30℃で最も優れることを観察したが、生育調査の時点では25℃の生育が最も優れた。施設栽培のサラダナでは、20～30℃の範囲で養液温度が高いほど生育が良いとしており（板木ら，1984），この結果とほぼ一致した。しかし、30℃以上の区では養液槽に白色の沈澱物が多くなったことから、高温条件では養液が劣化する可能性が示唆された。

養液温度が高い場合には、徒長により葉が縦長になり商品性が劣る可能性があったので、葉長／葉幅を測定した。この値は、養液温度が高いほど大きくなったが、Fig. 1で見る限り葉色も含めて品質的な差異は認められなかった。これらの結果から、リーフレタスの至適な養液温度は、25℃前後と考えられた。

生育段階による根の酸素吸収速度の差は明かではなかったが、根量の増大にとも

なって酸素吸収の絶対量が増加して溶存酸素濃度が低下した。これを防止し、生育の抑制が起こらないようにするためには、養液42 l当りに 2500 ml min^{-1} を通気して溶存酸素濃度を7.3ppm以上に維持する必要がある。しかし、養液槽の構造により水面からの酸素供給量が異なり、エアーストーンの深さと気泡の大きさによっても養液に吸収される酸素量が異なるので、ここで示した通気量は必ずしも一般的でない。また、養液の温度が高くなると、飽和溶存酸素濃度が低くなるのとは逆に根の酸素吸収量が急激に増大したので、高温条件下の通気は特に十分に行う必要があると考えられる。この場合、溶存酸素濃度の低い条件で育てると、高温時における根の酸素吸量の増加が少なく、形態的にも植物の適応が認められたが、基本的にはできるだけ十分な通気を行うのが安全と考えられる。ただし、養液の激しすぎる動揺が生育を抑制する可能性も示されたので、できるだけ細かな気泡が供給されるような構造にすることが望ましい。

以上のことから、リーフレタスの養液栽培では、養液濃度 1.5～ 2.0単位、pH 6 前後、養液温度25℃前後が生育に至適な条件と結論された。また、根の動揺が少なくて養液への酸素供給効率の高い方法でできる限り多く通気する必要性が明らかになった。

第2節 吊下げ方式によるモデル装置の試作と特性評価

生体重のモニタリングのセンサーには、歪ゲージ、ロードセルまたは電子天秤

を用いることができる。歪ゲージは、温度補償回路を組み込むなど細心の注意を払えば、安価に精度を高くできるが、取り扱いが複雑である。ロードセルは、温度補償回路が組み込まれている場合が多く、規格化されているため取扱いは容易であるが、やや高価である。電子天秤は、ロードセルを含んでいて精度は高いが、大きな装置の作成には不向きであり、余りにも高価である。一方、玉木（1983）は、精度の面からはロードセルが最も優れると考察している。これらのことから、ここではロードセルを利用して作物生体重のモニタリング装置を開発した。

ロードセルは規格化されているので、精度についてある程度は予測できる。しかし、環境が大きく変化する場合の出力の変化や長期間使用した場合の劣化については必ずしも明記されていない。したがって、作物生体重のモニタリングをする上で遭遇すると考えられる環境条件下で正確な計測を行うためには、ロードセルの特性と正しい使い方を明らかにしておく必要がある。

このため、ロードセルに定植板を吊り下げる方式のモデル装置を試作し、安定した出力を得るための印加電圧源を選定し、更に、ロードセルからの出力に対する温度および長期使用の影響を検討した。

第1項 モデル装置（1型）の構造

生体重をモニタリングするためのモデル装置（1型）をFig. 4に示した。引張・圧縮兼用型ロードセル（SINKOH製 UT-500GR, 0～500gが0～10mVに対応）をスタンドにとりつけ、発泡スチロール製の定植板をたこ糸で吊り下げる構造になって

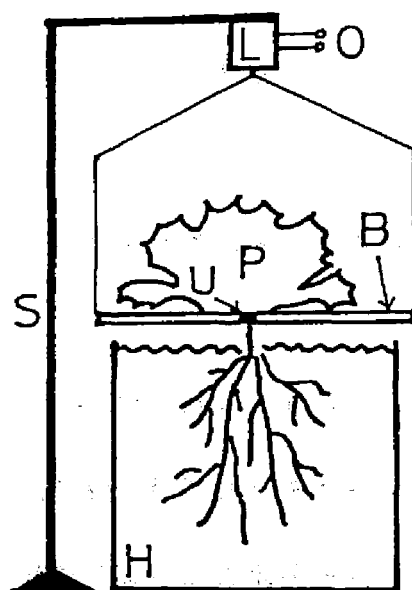


Fig.4. Model device(Type 1) for monitoring fresh weight of leaf lettuce. L, load cell; O, output; S, stand; U, urethan; P, plant; B, planting board; H, hydroponic.

いる。作物の生体重を計測する場合は、地際をウレタンキューブで包んで定植板の中央に開けた2.2 cm四方の植穴に定植する。この際、根は定植板の下に置いた1/2000ワグナーポット内の水耕養液に浸る。定植板が傾いてワグナーポットに接触するとロードセルへの負荷に誤差が生じるので、これを防止するためにはたこ糸の長さが調節できるようになっている。ロードセルには3 Vの印加電圧を与え、その出力はコンピュータ内臓型レコーダ（横川北辰電気製 YEW-3087）で電圧またはこれを変換した指示重量として連続測定できる。

第2項 印加電圧源の種類がロードセルの出力に及ぼす影響

実験方法

市販のACアダプター（SHARP製 EA-17E）、乾電池（単1型2個の直列接続）および安定化電源（菊水電子工業製 PAC7-10）をロードセルの印加電圧とし、250g（最大許容負荷の50%）の負荷による出力電圧をレコーダーで連続測定した。

実験結果

各種の印加電圧源を用いた場合のロードセルの出力をFig.5に示した。印加電圧源に市販のACアダプターを使用した場合、出力電圧は一定の範囲で変動し、乾電池では次第に低下した。しかし、安定化電源で印加した場合には安定した出力が得られた。

第3項 温度がロードセルの出力に及ぼす影響

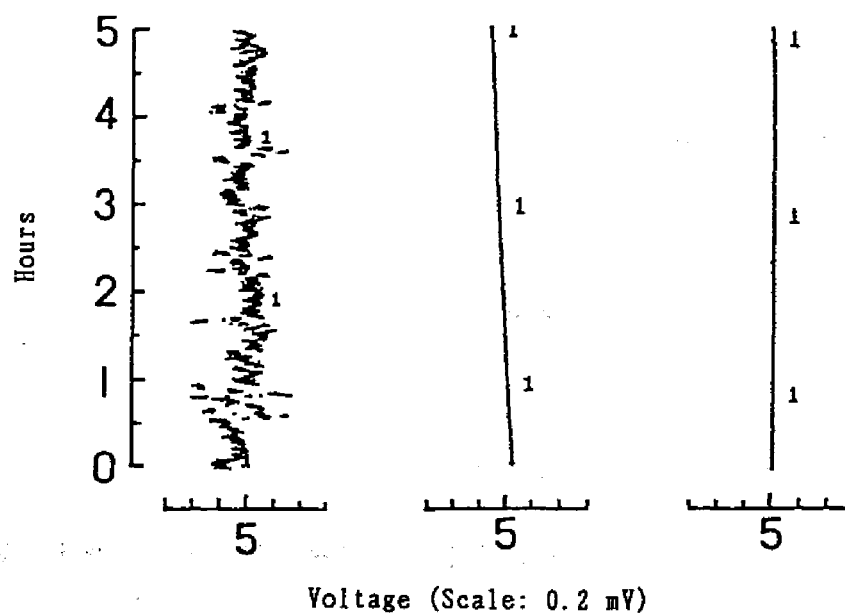


Fig. 5. Effect of power source on the output voltage of load cell. Left, AC adapter; Center, dry battery; Right, stabilized power source.

実験方法

モデル装置を恒温器内に入れ、定植板、たこ糸および分銅の合計重量が250gになるように調整して、ロードセルに最大許容負荷の50%の負荷を与えた。恒温器内の温度を3.7~40.1°Cの範囲で変化させて出力電圧を測定した。

実験結果

ロードセルの出力に及ぼす温度の影響をFig. 6に示した。3.7~40.1°Cの範囲ではロードセルの出力電圧に対する温度の影響は認められなかった。

第4項 連続使用が指示重量に及ぼす影響

実験方法

第2項の温度20°C条件下で20日間放置してロードセルを連続的に使用し、その前後の指示重量の関係を単回帰式として求めた。

実験結果

ロードセルに最大許容負荷の50%の負荷を与えた状態で20日間連続使用した前後の指示重量の関係をFig. 7に示した。負荷を与えた前後の指示重量の相関係数は1.00***と高かったが、負荷を与えて20日後の指示重量は始めのそれよりも約0.6g大きくなった。

第5項 考 察

ロードセルの印加電圧源の選定は、安定した出力を得るために重要である。す

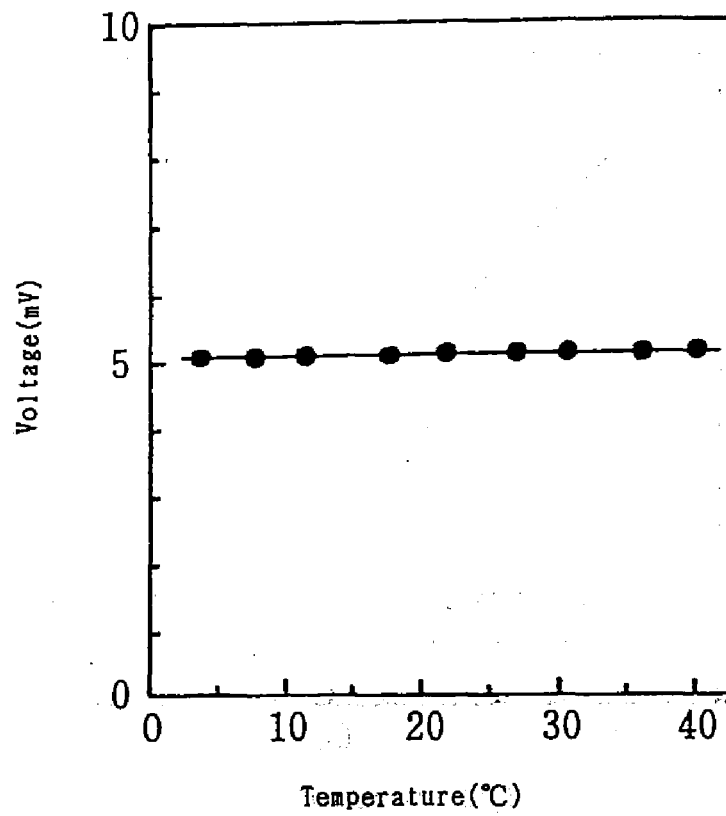


Fig. 6. Effect of temperature on the output voltage of a load cell.

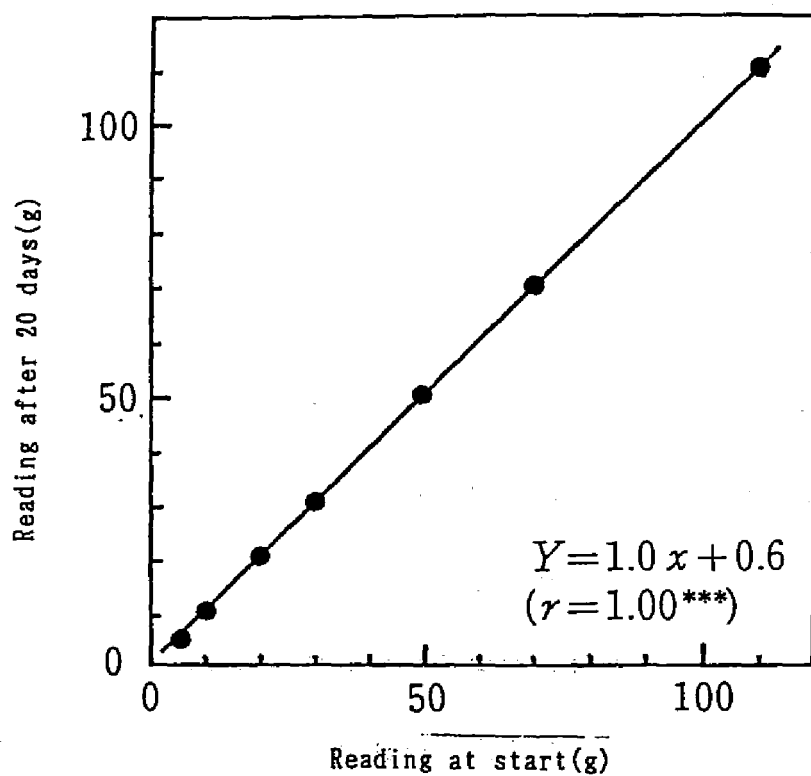


Fig.7. Relation between the reading of a load cell at start and that after 20 days.

なわち、市販のアダプターの平均的な電圧は一定であったが、整流が不十分で交流成分を含むため、瞬間的には電圧が変動して出力に一定の幅が認められた。したがって、出力の微細な変化がとらえにくいと考えられる。一方、乾電池では交流成分を含まないため、瞬間的な出力の変化はないが、時間の経過にともなう電圧の低下が認められた。これらに対し、安定化電源では定出力が得られたので、微細な生体反応を計測するためのロードセルの印加電圧源として優れていることが明らかになった。

実験に使用したロードセルは温度補償が施されているが、その精度が明かでないため、実験に必要な温度範囲（4～40℃）で検定した。その結果、ロードセルの出力は温度の影響を受けないことが明らかになった。

また、ロードセルの長期間の使用による変性（ヒステリシス）についても十分な使用説明がない場合が多い。このため、最大許容負荷の50%の負荷を与えて20日間使用したところ、最大許容負荷の約+0.01%程度のヒステリシスが認められた。しかし、この程度のヒステリシスは実用上の問題はないと考えられた。

モデル装置（1型）では、ロードセルの特性の検討を主目的としたため、ロードセルの個数が少ない吊下げ方式を採用した。吊下げ方式は、1個のロードセルで装置を構成できる利点はあるが、実験の過程で以下のような欠点も明らかになった。すなわち、①作物にセンサーの影ができて、光強度の分布が不均一になる、②風の影響を受けて指示値が不安定になる、③定植板の大きさに限界があり、一度に測定できる個体数が限られるなどである。

第3節 生体重モニタリング装置による指示値と植物体の実測値との関係

生体重モニタリング装置に作物を定植した場合、根は水耕養液中に浮遊することになる。そこで、本装置で生体重を計測するためには根重の影響について前もって明らかにしておく必要がある。

このため、当該装置に定植した植物体の実測重量とロードセルの指示重量との関係を検討した。更に、根重の分布を調べて水耕養液の水位が変化した場合の指示値の誤差を推定した。

第1項 測定部位について

実験方法

‘グラントラピッド’を本章第1節第1項の環境制御室で栽培した。ただし養液濃度は1.5単位濃度とし、小型エアーポンプで通気した。4、6、11および20葉期に至ったリーフレタスを1型装置の定植板中央に1株ずつ移植した。それぞれの生育段階でロードセルによる指示重量を計測するとともに、茎葉部、水面上部および全植物体の実測重量を測定して両者の関係を単回帰式として求めた。なお、指示重量の計測中は通気を止め、根の実測重量は付着した水分を素早く拭き取って測定した。

実験結果

ロードセルの指示重量と実測重量との関係をTable 8に示した。ロードセルの指示重量（Y）と茎葉部（ X_1 ），水面上部（ X_2 ）および全植物体（ X_3 ）の実測重量との関係は，それぞれ

$$Y = 1.01X_1 + 0.51$$

$$Y = 1.00X_2 + 0.36$$

$$Y = 0.91X_3 - 0.85$$

となり，相関係数はいずれも1.00であった。すなわち，ロードセルによる指示重量と実測重量には直線関係があった。また，指示重量は，茎葉の実測重量よりもわずかに大きく，全植物体のそれよりも著しく小さかったが，水面上のそれとよく一致した。

第2項 根重の深さ別分布

実験方法

‘グランドラビッド’を本章第1節第1項の環境制御室で栽培した。ただし養液濃度は1.5単位濃度とし，小型エアーポンプで通気した。11および20葉期に達した10個体ずつを供試した。各株を空中に持ち上げた状態で地際から根の深さ別に切り採って根重の垂直分布を調べた。根に付着した水分は素早く拭きとって測定した。なお，栽培期間中における水耕養液の水位は蒸発散によって低下したので，時々補水したところ，地際から2～5cmの範囲で変動した。

実験結果

Table 8. Relations between the fresh weights of leaf lettuce and the readings by a load cell.

Number of leaves	Reading by load cell ^Y (g)	Fresh weight (g)		
		Top ^{X1}	Above Water ^{X2}	Whole ^{X3}
4	1.40	1.30	1.42	1.84
6	4.97	5.11	5.33	6.22
11	29.0	26.8	27.4	33.9
20	109.5	108.3	110.0	121.0

$Y=1.01X_1+0.51$, $Y=1.00X_2+0.36$ and $Y=0.91X_3-0.85$.

根重の垂直分布をFig. 8に示した。11葉期および20葉期の茎葉重が26.8および108.3 gであったのに対し、根重は7.1および13.4 gであった。地際から2～5cmの範囲の根重は特に少なく、この範囲の根重は11葉期で茎葉部の1.1%、20葉期で0.7%であった。

第3項 考 察

生体重モニタリング装置による指示重量は、水耕養液の水面から上にある植物体の実測重量と一致した。すなわち、植物根および水耕養液の比重はほぼ1であるので、養液中の根重は養液による浮力によって相殺されると考えられる。

本装置では、定植板を設置し、更にそれと水耕養液との間隔を保つ必要がある。ので、構造上全ての根を水耕養液に浸すことができない。したがって、地際から最大で5cm程度の根重が茎葉重とあわせて計測されることになる。その誤差の範囲は、リーフレタス茎葉重の+1%程度と推定された。

以上により、本装置では培養液面から上にある植物体の生体重を計測できると、水位を高く保てば、地上部の重量に近似できることが明らかになった。

第4節 支持方式による生体重モニタリング装置の改良

吊下げ方式では、必要とするロードセルの個数は少ないが、①作物にセンサーの影ができて、光強度の分布が不均一になる、②風の影響を受けて指示値が不安

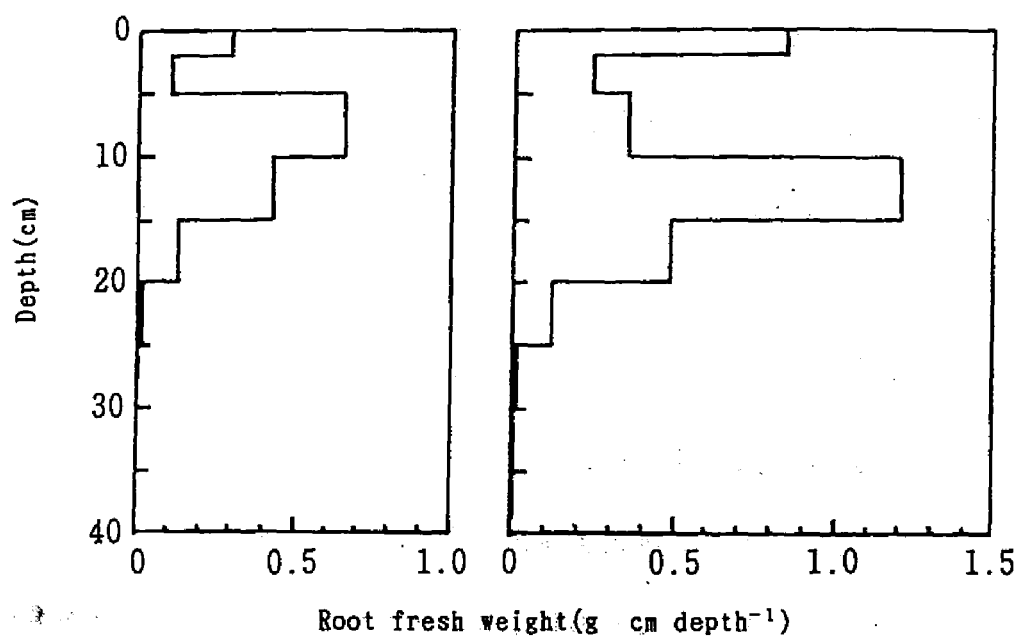


Fig.8. Vertical distribution of root fresh weight of leaf-lettuce with 11 leaves(left) and 20 leaves(right).

定になる、③定植板の大きさに限界があり、一度に測定できる個体数が限られるといった欠点があった。また、生体重のモニタリング装置に作物を定植して長期間の計測をする場合には、水位の低下によって計測値に誤差を生じる可能性が認められた。

一方、生体重のモニタリング装置は水耕を前提条件とするため養液の基本条件を検討したところ、濃度およびpHはときどき調整することによって対応が可能であるが、温度の管理と特に生育後半における溶存酸素濃度の低下防止には装置の構造的な対策が必要と考えられた。

したがって、長期間にわたる生体重のモニタリングには、吊下げ方式の欠点を克服するとともに水位の低下に基づく誤差を解消し、通気装置を付加する必要がある。更に、作物生体重の微細な環境応答を解明するためには、養液温度の制御と高養液温時における溶存酸素濃度の上昇のための積極的な通気が必要である。

そこで、定植板をロードセルで支える支持方式の生体重モニタリング装置を試作し、一定の水位を保ち、通気をするための装置を付加して生体重のモニタリング装置に改良を加えた。

第1項 個体群生体重モニタリング装置（2型）の試作

装置の構造

支持方式により個体群の生体重をモニタリングするための装置（以下2型という）の構造をFig. 9に示した。本装置は、1型装置と原理的には同じであるが、

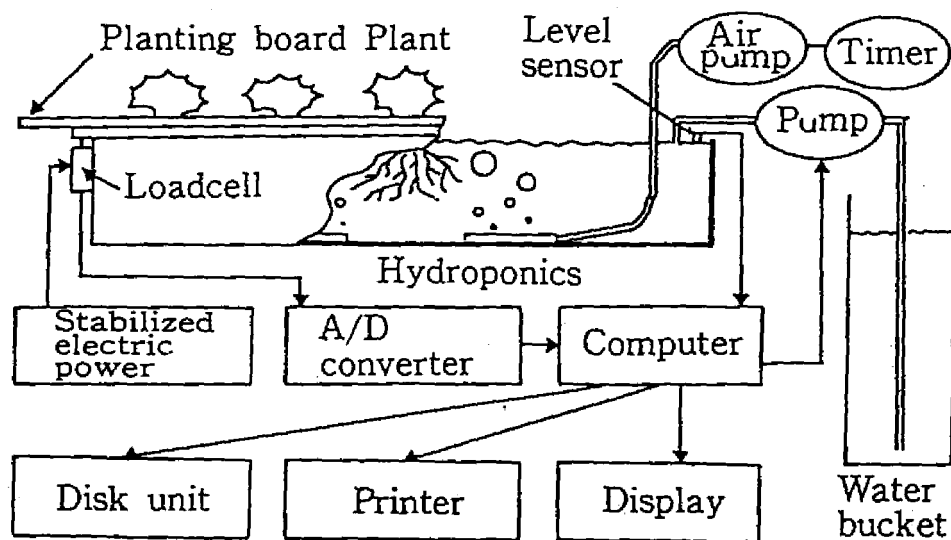


Fig. 9. Device (Type 2) for monitoring top fresh weight of leaf lettuces in community.

精度の向上を目的として水位を一定にするための装置および測定値を平均化して振動や風の影響を小さくするためのコンピュータを付加した。

生体重は、ウレタンキューブ、 60×100 cmの発泡スチロール製定植板、支持台とともにその4隅下に設置したロードセルで検知し、電圧に変換した。この出力をA/D変換器（横川北辰電気製 YEW-3087）でデジタル信号化し、5秒間隔で16ビットパーソナルコンピュータ（日本電気製PC-9801 μ ）に入力した。ロードセルからの出力は、個々のロードセルごとに作成しておいた検量線を用いて、コンピュータ内部で重量に変換・合計し、この値からウレタンキューブ、定植板および支持台の重量を差し引いて作物の生体重を求めた。さらに、暗期の終り1時間の合計720回の計測値を平均してその日の生体重とした。

水位は、電極式水位計でその低下を検出し、不足分を自動的に定流量ポンプ（ヤマト科学製PA-11D型、噴出能力 0.8 l min^{-1} ）で注水して一定に保った。

通気には小型エアーポンプを用い、長さ20cmのエアーストーンでバブリングした。

装置の特性と評価

本装置は、定植板の4隅を4個のロードセルで支持しているため、定植板の安定性が高い。アルミ枠などで定植板の湾曲を防止すれば、実用規模の個体群を計測するための大型の装置に作り変えることが可能である。

コンピュータを用いた計測値の平均化により、風などの影響による計測値の変動を除去できるので、精度の高いデータが得られる。

しかし、試運転の中で次のような問題点も明らかになった。すなわち、電極による水位の検出では、電極に養液中の塩類が付着して次第に誤動作を起こす頻度が増した。また、小型エアープンプによる通気では、エアーストーンからの気泡が水面上で破裂し、その飛沫が定植板に付着して重量計測に誤差を生じたり、ロードセルの故障の原因になった。更に、エアーストーンからの気泡は1作期の間に漸減した。これは、エアーストーンの中で空気中の二酸化炭素と養液中のカルシウムが反応して炭酸カルシウムになり、空気穴が塞がれたことに起因すると考えられる。

実用的な実験結果を得るためには、個体群で計測して実証する必要がある。しかし、個体数が増えるほど稀に発生する生育不良または枯死個体によって計測が中断される確率が高くなる。したがって、実験段階では個体数が少ない方が連続測定を確実に行えることが明らかになった。

第2項 個体生体重モニタリング装置（3型）の試作

装置の構造

支持方式により個体の生体重をモニタリングするための装置（以下3型という）の構造をFig.10に示した。これは、1個体または数個体を計測の対象とするもので規模は小さいが、基本的な原理は2型と同じである。これに一定の水位を保ち、養液の溶存酸素濃度を高め、更に養液温度を制御する方法に改良を加えたものである。まず、1/2000aワグナーポットの上に円板状の支持台を置き、その円周付

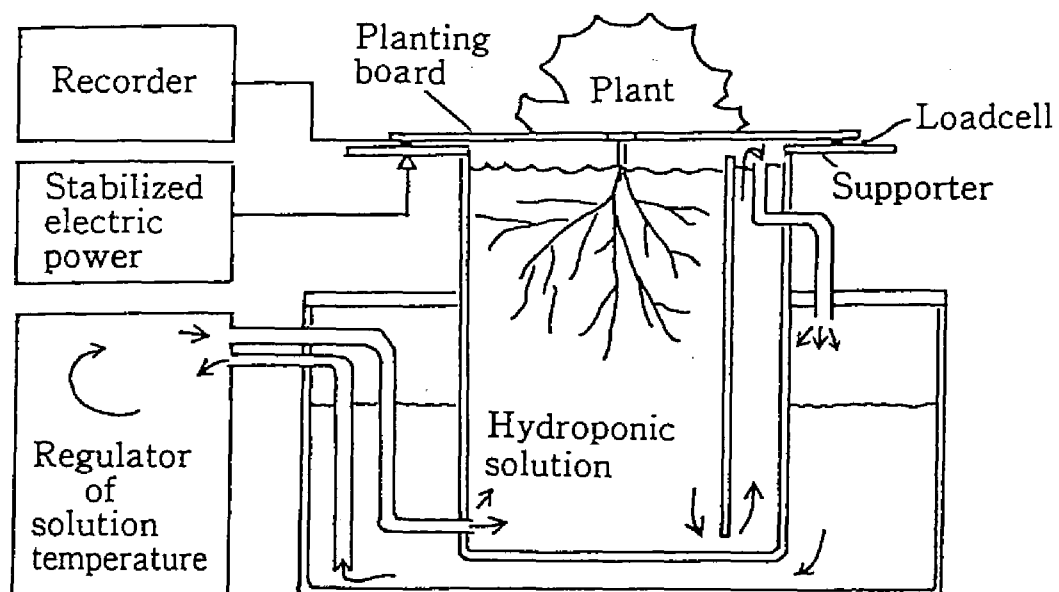


Fig.10. Device(Type 3) for monitoring top fresh weight of several leaf lettuces.

近の3点にロードセル（共和電業製120T-50B，0-50gが0-10mVに対応）を接着した。ロードセルには，安定化電源（菊水電子工業製PAC-7-10）で3Vの印加電圧を与えた。この上に植え穴を開けた発泡スチロール製の定植板を置いた。ワグナーポットは，養液槽に入れ，養液を養液温調節器（小松エレクトロニクス製CTR-220），ワグナーポット，養液槽の順に循環させて養液温およびポット内の水位を一定に保った。

3個のロードセルは並列に接続し，出力電圧をコンピュータ内蔵型記録計（横河北辰電機製YEW-3087）に入力し，記録計内部で定植板および作物支持用のウレタンキューブの重量を差し引いて作物重量のみを記録した。

装置の特性と評価

本装置は，数個体までの小葉菜類の生体重のモニタリングに適する。風の影響による計測値の変動が少なく，養液の水位と温度を一定に保つとともに溶存酸素を補給できる。したがって，高い精度の生体重計測ができ，原理的な構造上の問題はない。しかし，長期間の試用を行ってみたところ，恒温用の循環器の熱交換部が銅製である場合には，養液が次第に青色化し，銅過剰による生育異常が発生した。この問題は，熱交換部をステンレス製などに置き換えることによって回避できる。

第3項 考察

吊下げ型のモデル装置で得られた知見を基に，生体重を長期間にわたって精度

よく計測するための改良型装置を試作し、その特性を評価した。

風の影響を除去し、光分布を均一にするためには、ロードセルによる定植板の支持方式が吊下げ方式よりも優れた。しかし、支持方式ではロードセルの個数を多く必要とする点は逆に劣る。ロードセルの個数は、群落状態での計測には4個、数個体まででは3個が必要である。群落状態での計測手法は、生体重のモニタリングによって得られた研究成果を実用的な栽培で実証するために是非とも必要だが、長期的かつ連続的なデータ収集をする場合には、枯死または異常株の発生による計測の中断の可能性が高くなる。したがって、連続したデータを確実に得るためには、ある程度個体数を制限した方が安全性が高い。

その意味から、3形装置は実験条件下で連続したデータを精度よく収集するのに優れている。計測値の安定性、水耕養液の水位、温度および溶存酸素濃度の保持の上からみてもほぼ完成した装置と考えられる。

第5節 総合考察

リーフレタスを対象作物として水耕方式とロードセルの支持方式による生体重モニタリング装置を試作、改良し、特性を評価した。

このため、まず、装置の前提条件である水耕の養液が具備すべき条件を明らかにしようとした。これまでのレタスの養液栽培に関する研究は、クリスピーヘッドレタスまたはサラダナを供試したものが多く、リーフレタスのそれは少ない。し

たがって、実験は、リーフレタスの生育に適した養液の濃度、pH、温度、溶存酸素濃度の検索から始めた。

リーフレタスの生育に至適な養液の濃度は 1.5～ 2.0単位、pHは 6 前後、温度は 25℃前後、溶存酸素濃度は 7.3ppm以上であった。したがって、生体重のモニタリング装置では、水耕の養液条件をこれらの値に近づけることが望ましいと考えられる。

生体重の非破壊測定装置には、吊下げ型、曲げモーメント型およびロードセル型があり、センサはそれぞれ植物体の上、同および下位に配置される。吊下げ型には天秤法、滑車法が、曲げモーメント型にはさお支点法、片持ち梁法が、ロードセル型にはロードワッシャ法、多点支持法が考えられる。玉木（1983, 1984）は價格的に有利なことから片持ち梁法でシュンギクの生体重を計測したが、高辻ら（1978）のさお支点法などと比較検討して精度的にはロードセル型、曲げモーメント型、吊下げ型の順に優れると考察している。

まず、モデル装置（1 型）によって、水面から上にある植物体の生体重を精度よく非破壊かつ連続的に計測できることを明らかにした。この場合、養液面が地際部から 5 cm以内であれば、定植板から上の生体重よりも約 + 1 %以内の計測値が得られるが、ほぼ茎葉重に相当するので計測値の解釈に都合がよい。

試作、改良の過程では、水面の上下によって根部生長のモニタリングも可能と考えられた。すなわち、全植物体重から茎葉重を差引けば、根重が求められる。玉木（1986）は、シュンギクを供試し、根に付着した水分が自然流下して重量が

ほぼ一定になるのに約2時間を要し、これを完全に行おうとすると根の乾燥によって生育が阻害されると報告した。このことから、全植物体重を測定しようとする、根に付着した水分の除去が難しいと考えられたので、筆者は生体重のモニタリングの対象を茎葉部に限定した。これによって根を一定水位の養液に浸けたまま生体重を計測することになり、完全な連続測定が可能になるという利点を生じた。また、茎葉部の生体重は、葉菜類では収穫量に相当することから、この部位のモニタリングは特別の利用価値があると考えられる。

2型装置は、個体群のリーフレタス生体重をモニタリングするために開発した。この過程で、バブリングによる通気では養液の飛沫が定植板に付着して計測に誤差を生じるとともにロードセルの故障の原因になることが分かった。また、水位を一定にするための電極式レベルセンサは養液中の成分が沈着して誤動作を起こし易いことも明らかになった。さらに、個体数が多いほど生育異常や病個体の発生によって連続測定が中断される確立が高くなることも明らかになった。

そこで、実験用に個体または数個体の生体重をモニタリングするための3型装置を試作した。この装置では、恒温循環器を利用して養液の温度と水位を一定に保ち、同時に通気できる。これにより2型装置の欠点は解消され、生体重のモニタリング装置としてはほぼ完成した。

第6節 摘 要

水耕方式とロードセルを組み合わせて作物生体重のモニタリング装置を開発した。

供試材料としたリーフレタスについては水耕栽培における至適な養液条件が十分には解明されていないので、まず始めに本装置の性能として具備すべき養液条件を検討した。この結果、大塚ハウス肥料のA処方 (Table 1) では、濃度は標準の 1.5～2.0 倍、pH は約 6、養液温度は約 25℃ でリーフレタスの生育が最も優れた。溶存酸素濃度は 7.3 ppm 以上を必要とし、収穫期までこの値を維持するために必要な通気量は、42 l の養液に対して 2.5 l min^{-1} であった。

次に、生体重のモニタリング装置を試作し、その特性を明らかにした。ロードセルの出力は安定化電源を印加電圧源とした場合に最も安定し、温度変化および連続使用による計測値の変化はほとんどなく、計測値は水面から上の生体重に相当することが明らかになった。この装置では根の一部が水面から上に残るため茎葉重よりもやや大きな計測値が得られるが、根重の分布からみて +1 % 程度であった。

試作した装置を改良して、水位および養液温度を一定に、溶存酸素濃度を一定以上に保つことができ、微細な変化の検出が可能な生体重モニタリング装置を作成した。

第2章 生体重の長期計測と評価

緒 言

植物の生体重は生長を測る最も基本的な計測量の一つである。特に野菜では、収穫物の大部分を水分が占めるので環境条件と生体重との関係を研究する意義は大きい。

これを行うための前提条件として、高辻ら（1978）は歪ゲージによる吊下げ型の生体重モニタリング装置を、玉木（1983）は曲げモーメント型の同装置を開発した。しかし、歪ゲージは安価ではあるが、温度補償回路の組み込みや特性の検定などの専門知識を必要とするので、取扱いは必ずしも容易でない。玉木（1983）は、やや高価ではあるが、ロードセルの利用によって精度の高い装置になるであろうと述べている。

そこで、第1章では、ロードセルを用いた生体重のモニタリング装置を開発し、その特性を明らかにした。しかし、実用之際しては、長期間にわたる植物生体重の連続測定を行って正確にモニタリングができるか否か確認する必要がある。また、モニタリングによって得られた計測値を正しく評価するためには、生体重と他の形質との関係を明らかにしておかなければならない。

このためにまず、定植直後のリーフレタス生体重をモニタリングし、活着に至る前後の生体重の変化が根の形態や活性の変化に対応しているか否かを検討した。

次に、活着に続く栽培の全期間を通して生体重をモニタリングし、生体重によって得られる情報と生育状態を表す形質との関係を生育段階ごとに解明した。更に、暗期間の呼吸の推移、明期の光強度と暗期の生体重増加率との関係を明らかにして長期計測における暗期の取扱い方を検討した。

第1節 活着までの生体重と根の活性の変化

気相の多い培地で育てた苗を水耕の養液に定植した場合、活着に必要な期間は根の損傷の程度と環境条件の違いによって2～7日程度であることが観察されている。生体重をモニタリングして作物の環境応答を明らかにしようとする場合、定植してから活着するまでの反応は活着後の反応と区別しなければならない。

そこで、第1章で開発した装置が、定植してから活着するまでの生体重の変化を正しくモニタリングしていることを確かめるとともに、リーフレタスの活着に要する期間を明らかにする。このため、定植後の生体重をモニタリングするとともに、根の形態、生長量、酸素吸収速度およびTTC還元力の変化を調べた。更に、養液温度を異にした場合に活着の時期と生長速度が異なるか否かを検討した。

第1項 定植直後の生体重の変化

実験方法

リーフレタス品種「グランドラビッド」をもみがらくん炭に播種し、気温20±

1℃, 相対湿度 $90 \pm 5\%$, 光量子密度 $240 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で常時照明して育苗した。実験中の環境条件は、特に断わらない限り育苗中のそれと同じにした。本葉2枚展開時に根を傷つけないように掘上げ、基部をウレタンキューブで包み、第1章第4節第2項で試作した3型の生体重モニタリング装置に定植した。養液槽には大塚ハウス肥料A処方の標準の1.5倍濃度養液を満たした。

3型の生体重モニタリング装置は、発泡スチロール製の定植板を3個のロードセルで支え、出力される電圧をコンピュータ内臓型レコーダ（横川北辰電機製YE W-3087）で重量に換算して自動的に記録できる。定植位置は定植板上に描いた一辺が15cmの四角形の4隅とその中心とし、5個体を供試した。

更に、同じ条件で養液温度を10および30℃に変えて5個体の定植後の生体重の変化をモニタリングした。測定始めの生体重は、各温度処理区で少しずつ異なったので、定植時の生体重を1とした比で経時変化を表した。

実験結果

20℃の条件下でリーフレタスを水耕養液に定植してから1週間の生体重の推移をFig.11に示した。生体重は始めの内減少し、定植後2日目から増加し始めた。

次に、養液温度が10, 20および30℃の場合の生体重の推移をFig.12に示した。どの養液温度でも生体重は一旦減少してから再び増加した。生体重が減少から増加に転じるまでの日数は、養液温度が10, 20および30℃でそれぞれ2, 1および0.5日と、高温ほど短かく、その後の生体重の増加率は高温ほど高かった。

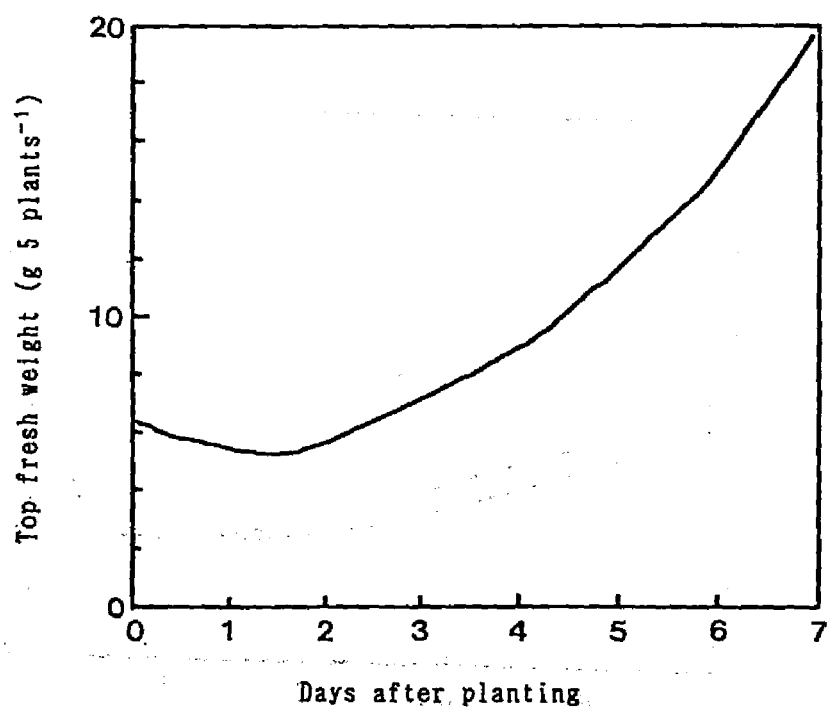


Fig. 11. Change in top fresh weight of leaf lettuce after planting in nutrient solution (20°C).

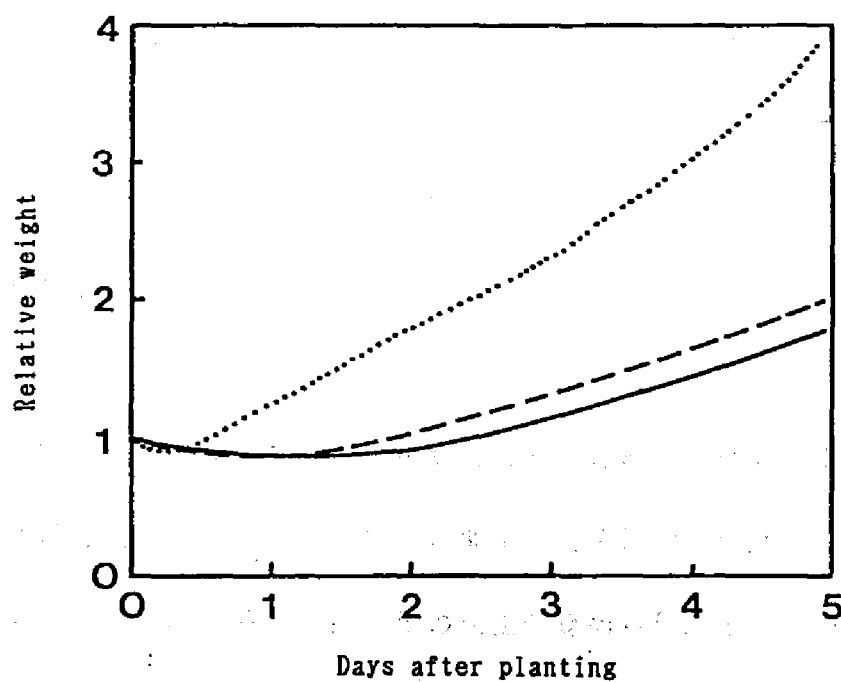


Fig.12. Relative change in the top fresh weight of leaf lettuces after planting in nutrient solutions, which temperatures were controlled at 10°C(—), 20°C(---) and 30°C(.....).

第2項 根部形態および酸素吸収速度の変化

実験方法

第1項の条件下で栽培した平均的な生育状態の1個体を選び、その根を写真撮影した。同時に5個体の根の20℃における酸素吸収速度を測定した。酸素吸収速度は、地際で切り採った根を酸素飽和脱塩水とともに100 ml容広口びんに入れ、酸素電極を貫通したゴム栓で蓋をし、マグネチックスターラで一定の流速を与えた場合の溶存酸素濃度の低下から算出した。マグネチックスターラの上にはステンレス製金網で境を作って根が損傷するのを防いだ。広口びんの周囲には20℃の水を流してびん内の温度を制御した。

実験結果

本葉2枚展開時のリーフレタスを水耕養液に定植した後の根部形態の変化をFig.13に示した。もみがらくん炭から掘上げた直後の根は屈曲していたが、定植後2日目には直線的で長くて白い根の発生が認められ、根量は日数の経過とともに増大した。

本葉2枚展開時のリーフレタスを水耕養液に定植した後の根による酸素吸収速度の変化をFig.14に示した。根の酸素吸収速度は、定植後2日まで増加し、その後はやや変動したもののほぼ一定の水準で推移した。

第3項 T/RおよびTTC還元力の変化

実験方法

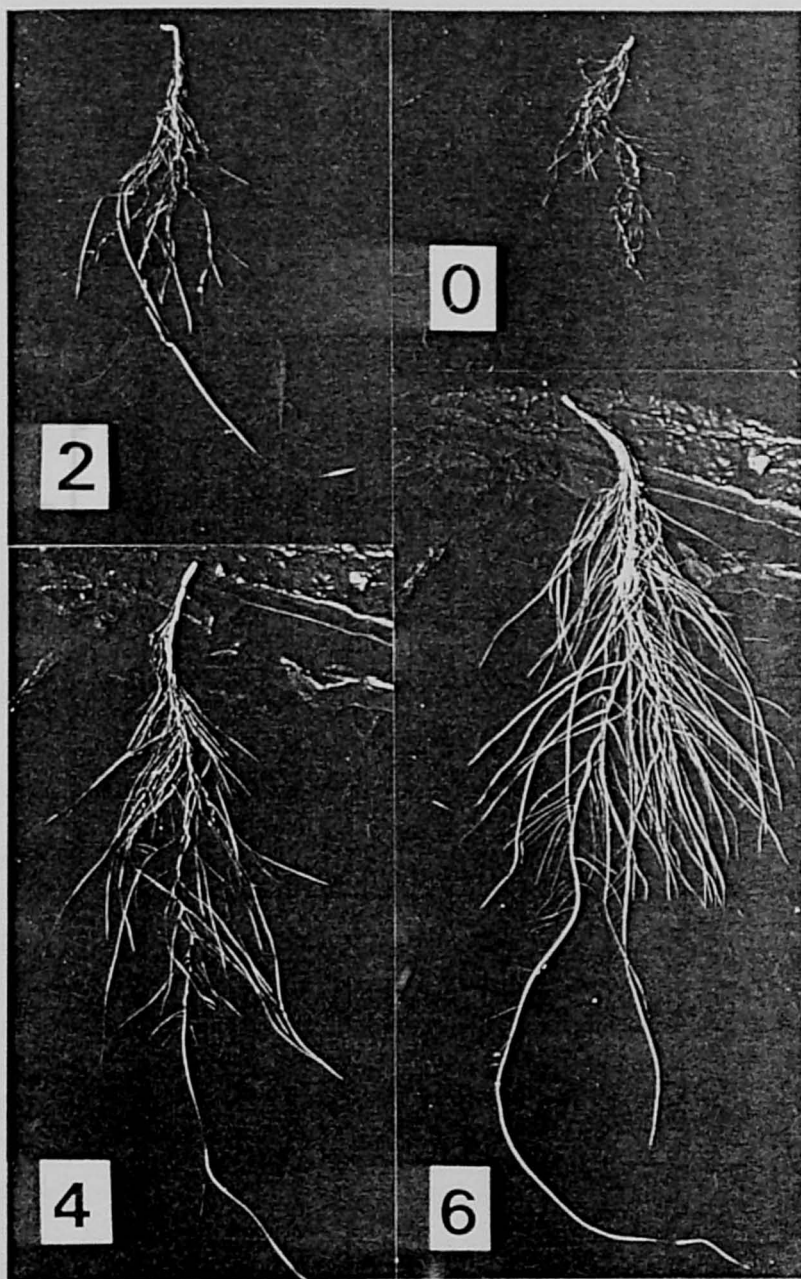


Fig. 13. Change in configuration of root of leaf lettuce after planting in nutrient solution. Numbers indicate days after planting.

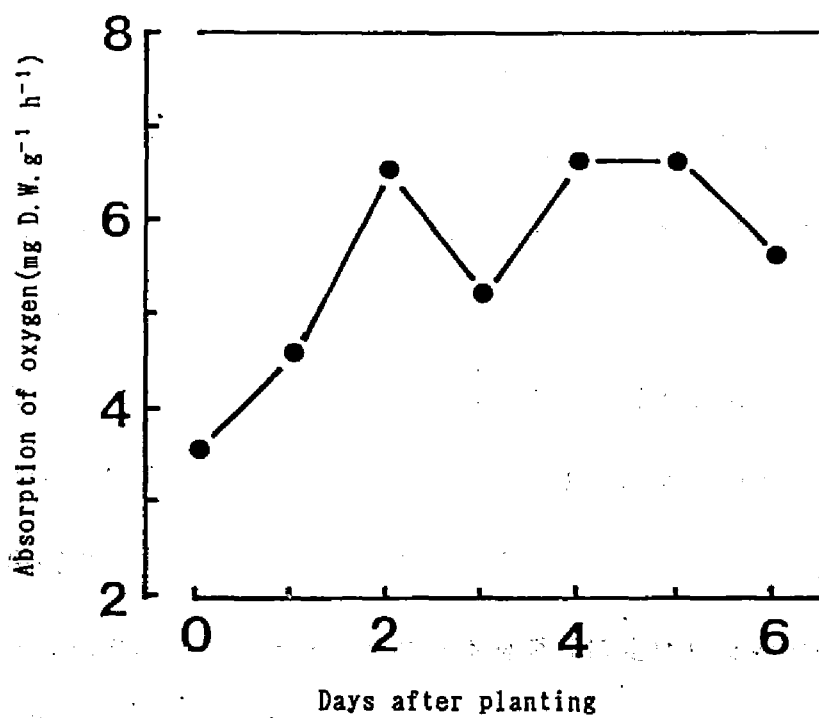


Fig.14. Change in absorption of oxygen by root of leaf lettuce in nutrient solution.

第1項の条件下で栽培したリーフレタスの中から平均的な生育状態の5~12個体を毎日選び、莖葉重および水分を試き取った根重とそれらの乾物重を測定した。根については、数個体で乾物重を、残りでTTC還元力を測定した。

TTC還元力は、以下の方法で測定した。まず、切り採った根をよく洗って10 mlのTTC液(0.05Mりん酸緩衝液による0.5%溶液)に浸し、30℃、暗黒下に2時間保った。これに2 mlの2N硫酸を添加して反応を停止させた後、根を取り出し、よく拭いて生体重を測定した。その根を裁断し、酢酸エチル5 mlとともに磨砕した。上澄みの酢酸エチル(赤色を呈する)をメス試験管に採取し、更に上澄みの赤色が消えるまで酢酸エチルの添加、磨砕、上澄みの採取を繰り返した。上澄みまたはその希釈液の波長470 nmにおける吸光度を測定した。別に作成した検量線からTTC含量を求め、乾物重当り、1時間当りのTTC還元力に換算した。

実験結果

本葉2枚展開時のリーフレタスを水耕養液に定植した後の根重およびT/Rの変化をFig.15に示した。根重は、定植後2日までは直線的に、それ以降は指数関数的に増加した。T/Rは、定植後2日までは約16で推移し、変化が小さかったが、3日からは大きく低下して、5日には約4でほぼ一定になった。

本葉2枚展開時のリーフレタスを水耕養液に定植した後の根のTTC還元力の変化をFig.16に示した。TTC還元力は、定植後2日までの増加が大きく、定植後3日を最高としてその後は減少した。

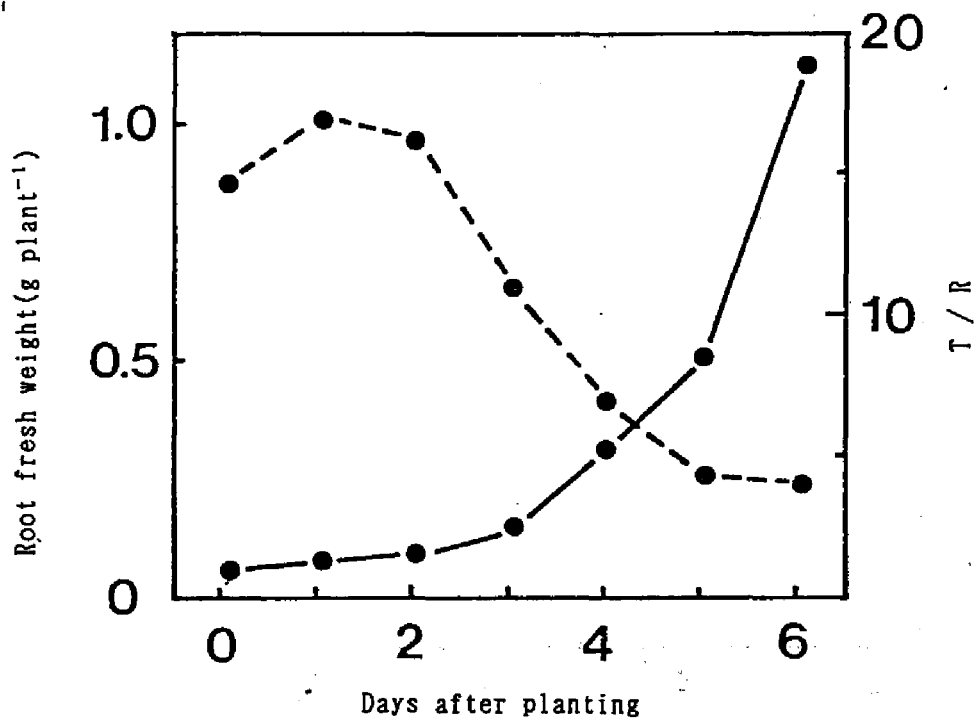


Fig.15. Change in root fresh weight() and T/R(top/ root,) in leaf lettuce after planting in nutrient solution.

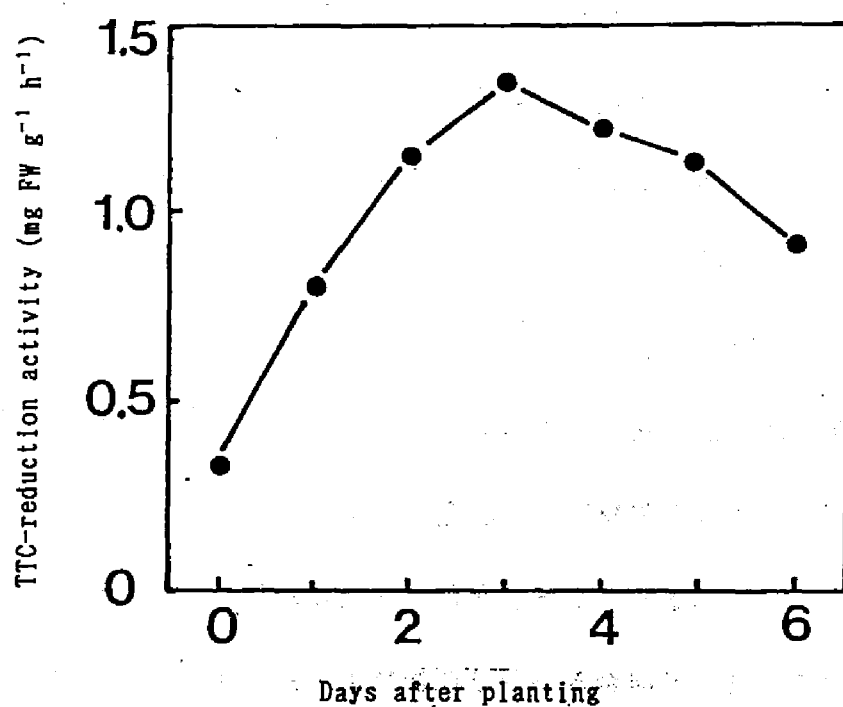


Fig.16. Change in TTC-reductin activity of root in leaf lettuce after planting in nutrient solution.

第4項 考 察

養液温度が20℃の場合、定植してから生体重が増加し始めるまでの日数はおおよそ2日であった。この時期は、水耕に特有の形態をした新根が発生し、T/Rが低下し、根の酸素吸収速度がほぼ安定する時期と一致した。

これらと平行してTTC還元力も測定した。TTC還元力は、基質、脱水素酵素の補酵素、フラビン酵素が十分に存在する条件で脱水素酵素の活性を表すので、従来から根の活性を表す代表的な指標の一つとしてしばしば測定されて来た。本実験では、TTC還元力は定植後3日を最高としてその後は低下した。実験の観察結果によれば、TTC還元活性を示す根の赤色部位は、根端から少し離れた分裂組織近辺に限られており、それが根全体に占める割合は根の伸長にともなって低下した。すなわち、本実験でTTC還元力が定植後3日を最高にその後低下したが、これは根が急速に伸長し始めた結果と考えられる。

以上のように、定植後の生体重が増加し始める時期は、根の形態および活性の変化からみて活着の時期とほぼ一致した。したがって、生体重のモニタリングによって活着の時期を知ることができることが明らかになった。

10、20および30℃の養液に定植した後の生体重のモニタリング結果からは、高温ほど速く活着すること、最も遅くても3日以内に活着することが明らかになった。また、その後の生体重の増加も高温ほど速いことが明らかになった。

第2節 収穫までの生体重の変化および他の形質との関係

高辻（1982）はサラダナ，玉木（1983，1984，1986）はシュンギクの生体重を1作期間モニタリングして，指数関数的な生長曲線を示した．生体重は，生長を表す重要な指標ではあるが，これだけでは作物がどの生育段階にあるか判断できない．

そこで，本節では，生体重をモニタリングしてその増加率の推移を明らかにするとともに，減水量からは蒸散量を算出した．これらと平行して行った解体調査の結果を用いて生体重と他の形質との関係を整理するとともに，第1章で開発した装置が作物生体重を正しくモニタリングしているか否か検討した．

第1項 生体重およびその増加率の推移

実験方法

日長が18時間で他の環境要因は第1章第1節第1項と同じ条件の環境制御室内で実験した．‘グランドラビッド’の催芽種子をもみがらくん炭には種し，7日後に生育の均一な15株の苗を選び，ウレタンキューブにはさんで2型装置の発泡スチロール製定植板に株間15cmで定植した．80×45×20cmの養液槽には，大塚ハウス肥料A処方の標準の1.5倍濃度の養液を満たした．pHは，水酸化ナトリウムを用いて6前後になるように時々調節した．この結果，栽培期間中の養液のECは，3.0～3.7mS cm⁻¹，pHは5.3～6.3の範囲にあった．通気は，小型エアーポンプで行い，生体重の測定中は停止した．生体重の計測は定植後9日目から始めた．

実験結果

リーフレタスの生体重およびその増加率の推移をFig.17に示した。生体重は、17日間で23倍になり、その増加率は、 $10.3 \sim 28.8 \text{ \% day}^{-1}$ の範囲にあった。生体重の増加率は、測定始めから5日目および11日目にそれぞれ最低および最高になり、そのときの生体重は、それぞれ約10および30gであった。

第2項 生体重と他の形質との関係

実験方法

第1項と同じ条件でリーフレタスを水耕し、2～4日ごとに作物の直上1.5cmから作物の投影図を写真撮影した。作物の投影面積は、デジタイザー（0.1mm精度）を用いて写真から実面積に換算して求めた。被覆率（作物が定植板を覆う割合）は以下の式によって求めた。

$$CR = 100 \times (PA / CA)$$

ここで、CRは被覆率（%）、PAは作物の上からの投影面積（ cm^2 ）、CAは栽培面積（ cm^2 ）を表す。

このとき、12～20個体を切り採って解体し、根重、葉数、葉面積および乾物率を調べた。葉数は、葉身長1cm以上を目安に数えた。葉面積は、調査日ごとに生育中庸の1個体を精密に測定し、葉重との関係から全体の葉面積を推定した。乾燥は、 80°C で3日間行った。

水位を一定に保つために加えた水量を蒸発散量とした。蒸発量は、環境制御室

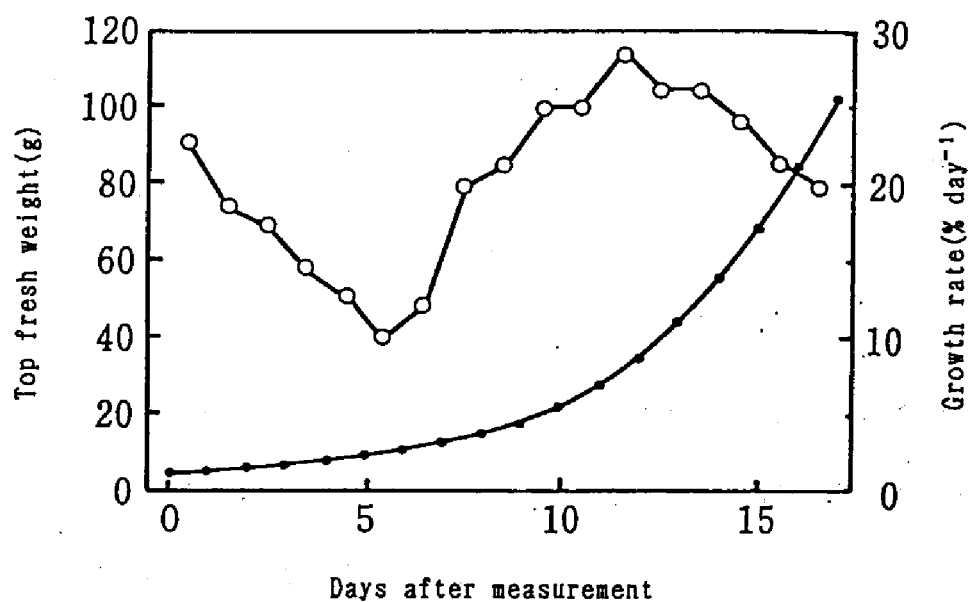


Fig.17. Changes in top fresh weight and the growth rate of leaf lettuce. ●, top fresh weight; ○, growth rate.

および水耕装置を作物のない状態で3日間運転した場合の注水量から求めた。明期および暗期の蒸散量は、蒸発散量から蒸発量を差し引いて求めた。

実験結果

生体重と他の形質との関係をTable 9に示した。測定始めの生体重は4.4gであり、このときの乾物率は8.5%，葉数は3枚，蒸散量は 10ml day^{-1} ，葉面積は 100cm^2 ，投影面積は 10cm^2 ，根の乾物重は22mgであった。また，測定終了時の生体重は102.6g，乾物率は5.2%，葉数は16枚，蒸散量は 97ml day^{-1} ，葉面積は $2,337\text{cm}^2$ ，投影面積は 225cm^2 ，根の乾物重は851mgであった。乾物率は次第に低下する傾向にあり，とくに5日目の低下は著しかった。蒸散量は，測定始めから5日目が最も少なく，その後は著しく増加した。

蒸散速度の推移をFig. 18に示した。蒸散速度は， $0.13\sim 0.58\text{ g dm}^{-2}\text{ h}^{-1}$ の範囲にあった。測定始めから5日目の蒸散速度の低下は著しく，その後再び上昇したが，11日目以降は再び低下した。

葉面積／投影面積の推移をFig. 19に示した。葉面積／投影面積は測定始めから8日目まで次第に小さくなり，11日目からは再び大きくなった。

葉面積指数および被覆率の推移をFig. 20に示した。葉面積指数は，次第に増大し，11日目に2.8，13日目に4.6になった。被覆率は，測定始めから次第に上昇し，11日目で81.1%，13日目以降は100%になった。

第3項 考 察

Table 9. Changes in the top fresh weight and other growth indicators of leaf lettuce.

Days ^a	Fresh weight ^b (g)	Dry matter rate (%)	Number of leaves	Transpiration (ml day ⁻¹)	Leaf area (cm ²)	Projection area ^c (cm ²)	Dry matter weight of root (mg)
0	4.4	8.5	3	10	100	10	22
2	6.4	7.2	4	10	146	29	45
5	9.7	6.0	6	5	222	72	77
8	14.4	6.8	8	31	331	118	125
11	27.4	6.6	11	57	632	183	294
13	44.6	6.4	13	79	1029	225	404
17	102.6	5.2	16	97	2337	225	851

^a Days after the start of measurement.

^b Reading of the continuous measurement system.

^c Plants were projected from the height of 1.5 m.

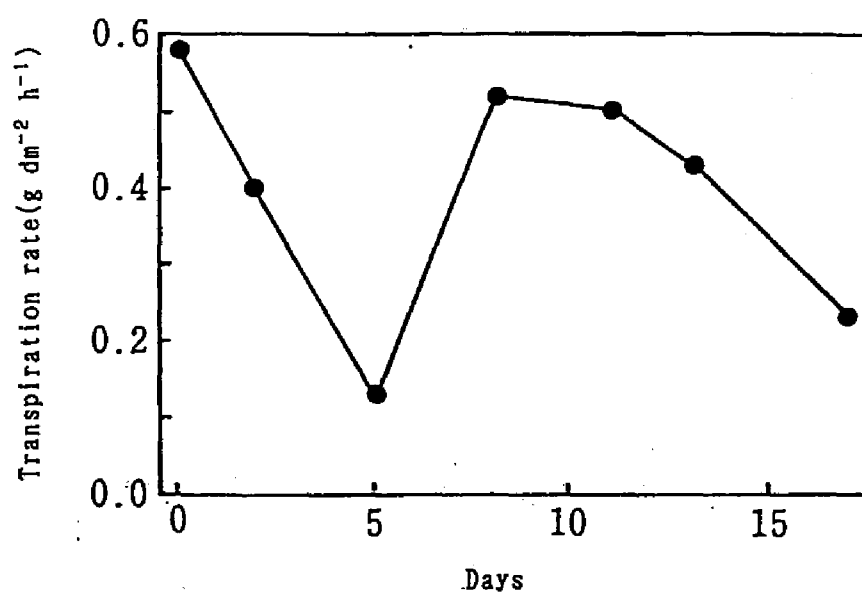


Fig.18. Change in transpiration rate of leaf lettuce. Measurements were started from 16 days after seeding.

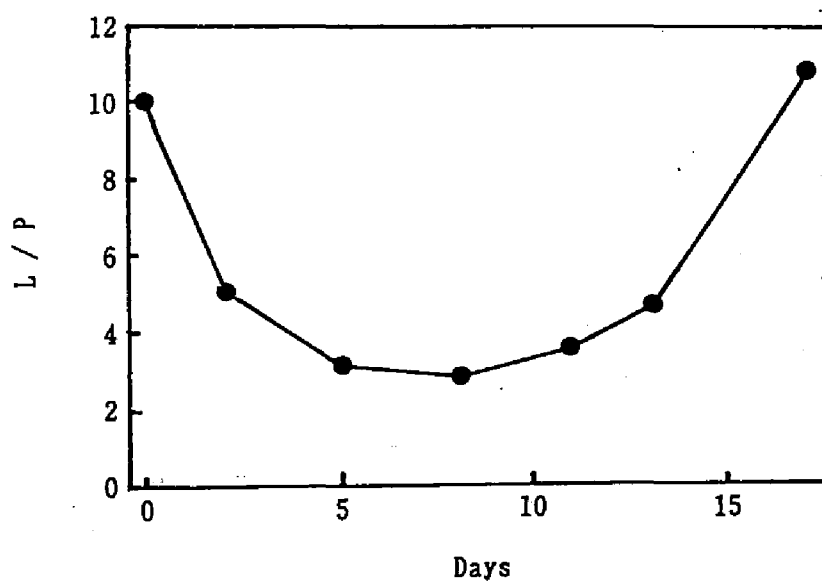


Fig.19. Change in L/P(leaf area/projection area) of leaf lettuce. Measurements were started from 16 days after seeding.

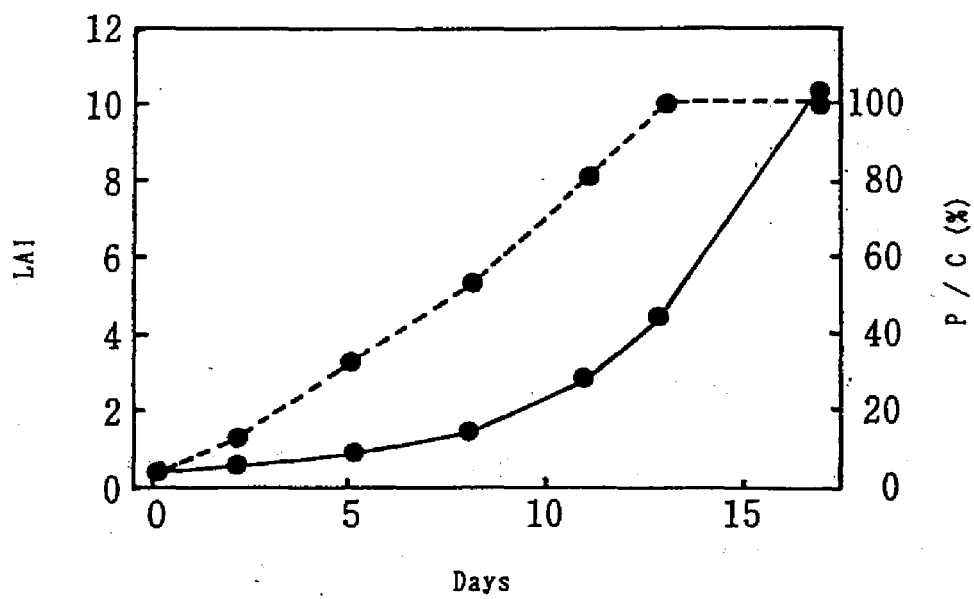


Fig. 20. Changes in LAI(leaf area index) and P/C(projection area/cultivation area) of leaf lettuce. Solid line and dashed line are LAI and P/C, respectively.

リーフレタスの生体重は、サラダナ（高辻，1982）やシュンギク（玉木，1983，1984，1986）と同様に指数関数的に増加した。これらの葉菜はいずれも生育盛期に収穫されるので、その範囲では生長曲線はS字にはならない。毎日の生体重の変化から生体重の増加率を算出したところ、測定始めから5日目の生体重が約10 gのときに最低になり、この時期における蒸散量および蒸散速度の一時的な低下と一致した。また、葉面積／投影面積もほぼ最低になり、他の時期よりも葉が横に広がった体勢にあった。葉の横方向への広がりがこの生育段階に特有の現象であるか、蒸散量および蒸散速度の低下に見られる吸水の低下に起因する結果であるかは明らかでない。逆に、測定始めから11日目の生体重が約30 gのときには、生体重の増加率は最高になった。このころの被覆率は測定始めから11日目が81.1%，13日目が100%となり、上から定植板が見えない程度に茎葉が繁茂した。葉面積指数は、11日目が2.8，13日目が4.6になったが、結球レタスの最適葉面積指数がおおよそ4であるとの報告（星野ら，1977）もあるので、このころからは相互遮蔽によって生長の速度が低下したと考えられる。

以上、生体重のモニタリング結果と解体調査して求めた他の生育状態を表す形質との関係が整理でき、第1章で開発した装置によって生体重の変化をモニタリングできることが確かめられた。

第3節 暗期における生体重の変化

弱光条件で作物が徒長的に生長し、このような状態の作物は縦長で水分率が高いことはよく知られている。したがって、作物の生体重は同化産物の生成を伴わずに吸水を主体として増加し続ける可能性がある。

そこで、同化産物の生成を伴わない場合として暗期を与え、生体重と呼吸の推移をモニタリングするとともに、明期における同化の程度と暗期における生体重の変化との関係を明らかにした。これにより、暗期の生体重をモニタリングする際の留意事項を検討した。

第1項 暗期における生体重および呼吸の推移

実験方法

本章第1節第1項の条件で栽培した茎葉重約30gのリーフレタス2個体を同化箱内の3型装置に定植した。同化箱は、一辺が50cmの透明アクリル板製で、形状は立方体とした。同化箱内は、空気流量 $60\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ 、気温 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $80\pm 20\%$ 、光量子束密度 $255\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、日長12時間とした。3日後に消灯して7日間の暗黒処理を行った。呼吸による炭酸ガス濃度の上昇は、同化箱の空気入出口の二酸化炭素濃度を赤外線ガス分析計（富士電機製 ZAP-2型）で測定して求めた。外気を取り入れた結果、同化箱入口の二酸化炭素濃度は約350ppmであった。

これとは別に、処理前の明暗周期をそのまま繰り返す対照区と暗黒処理区を設定して、毎日1回写真撮影した。この写真から個体側面の縦／横を求めて徒長による形態的な変化を見るための指標とした。縦／横は、その個体の最大の高さと

幅の比とした。

実験結果

暗黒下におけるリーフレタスの生体重および呼吸による同化箱内の二酸化炭素濃度の上昇をFig.21に示した。生体重は、消灯後12時間は順調に増加したがその後の増加はわずかであった。30時間後から一旦減少し始めた生体重は、2日後に再び増加し始めた。生体重の増加は3日以降は著しく少なくなり、約5日後には認められなくなった。

呼吸による二酸化炭素濃度の上昇は、消灯後12時間はほぼ一定であったが、それから2日までは急速に、その後は徐々に減少した。

長暗期におけるリーフレタス個体側面の縦／横の推移をFig.22に示した。明暗を繰り返し与えた場合の縦／横はほとんど変化しなかったが、連続して暗黒を与えると処理後2日目から縦／横が大きくなった。

長暗期におけるリーフレタスの形態変化をFig.23に示した。暗黒処理後2日以降に芯部の盛り上がりが認められた。処理後7日目に暗黒下から作物を取り出したところ、茎が伸び、芯部では葉が縦長で、色が薄く、いわゆる徒長した形状であった。

第2項 明期の光強度が暗期の生体重に及ぼす影響

実験方法

第1節第1項の条件下で栽培したリーフレタスを3型装置に定植し48, 79,

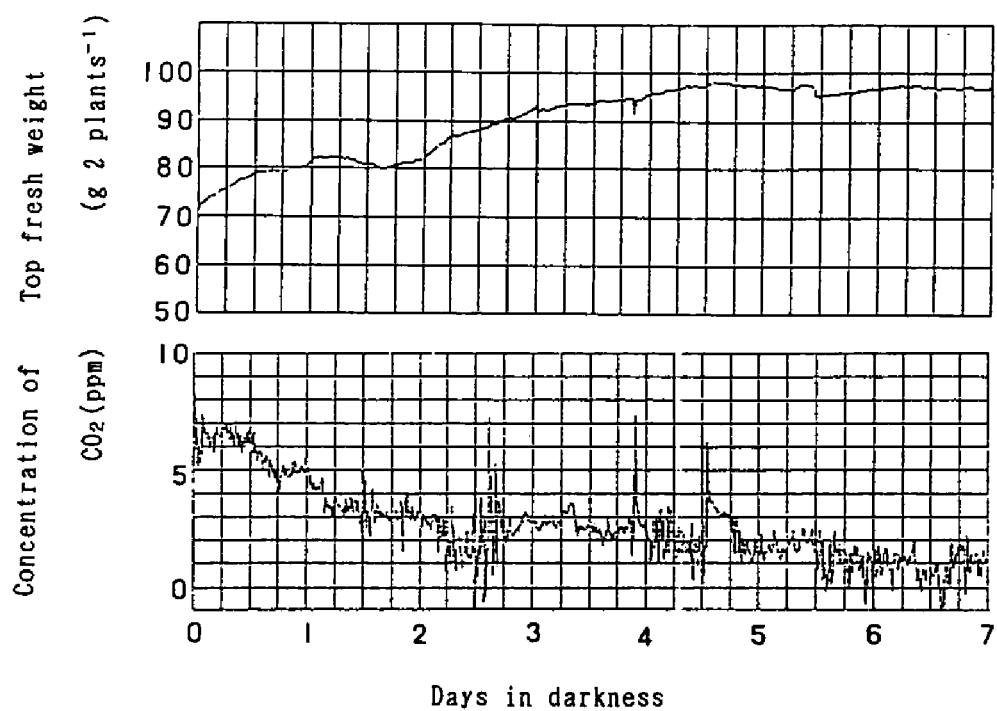


Fig. 21. Changes in top fresh weight of leaf lettuce and increment of CO₂-concentration around the plant in dark period.

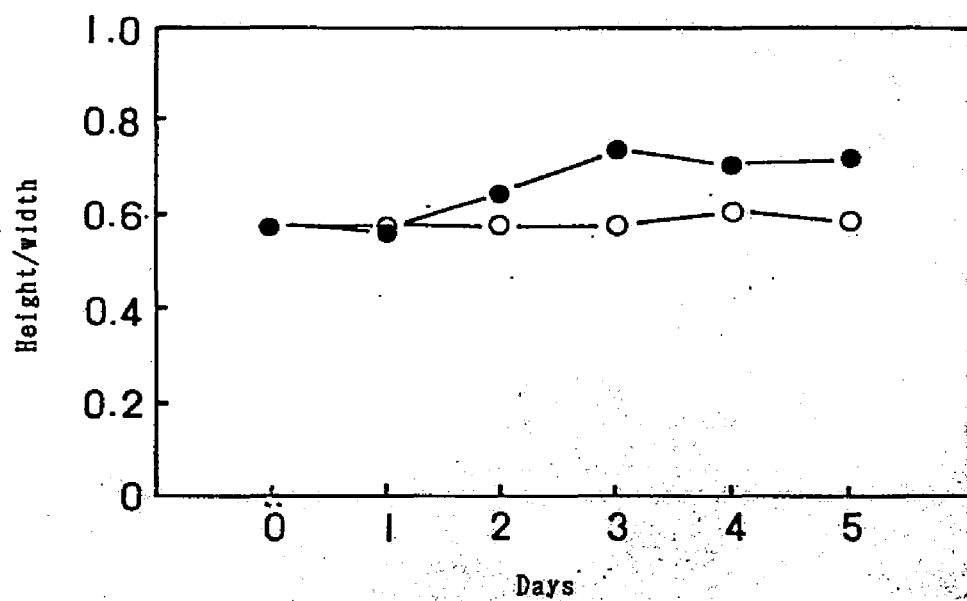
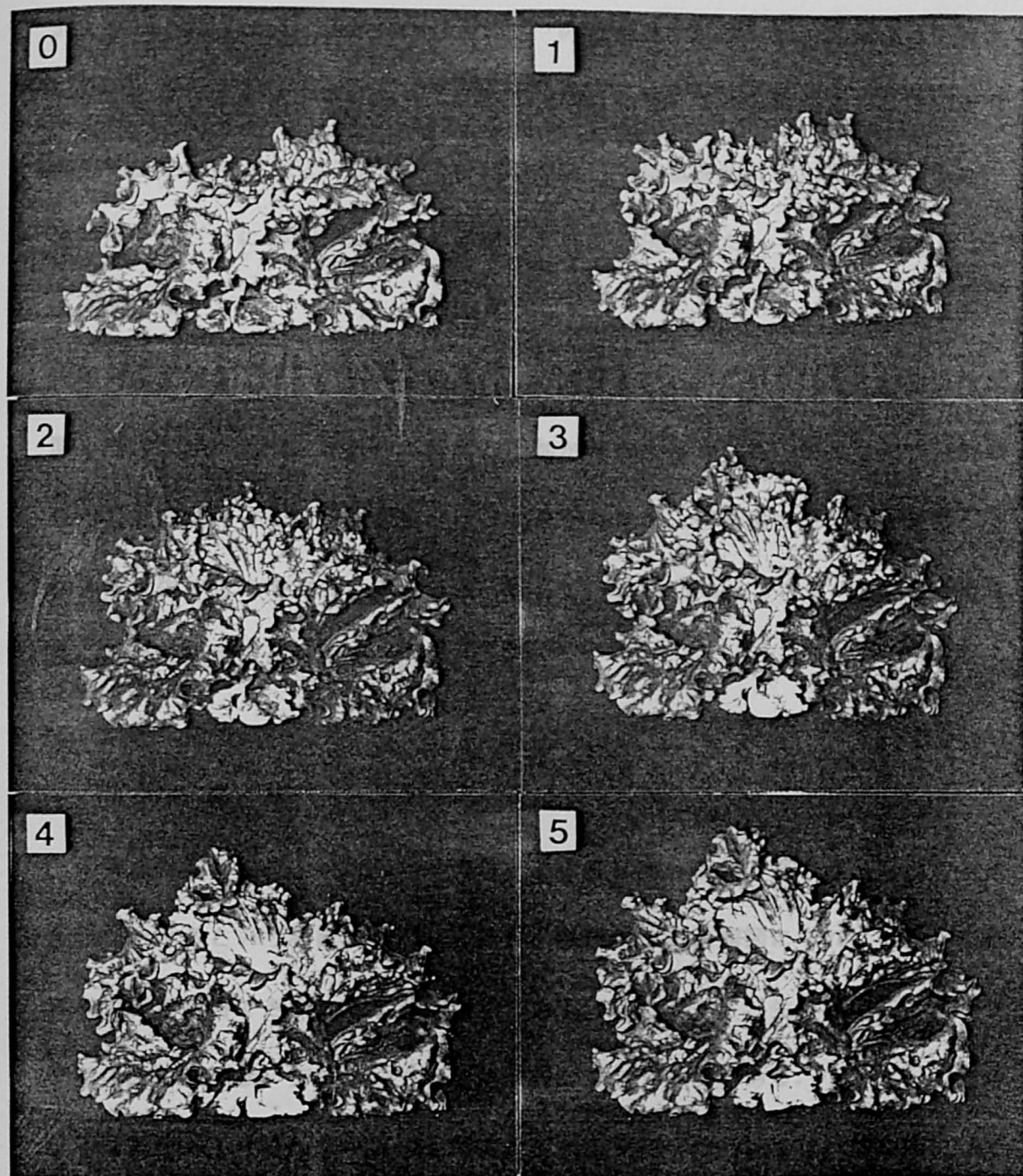


Fig. 22. Change in the ratio of height to Width of leaf lettuce under continuous dark(●) and alternation of 12 h light and 12 h dark(○).



始めの12時間の増加が大きく、3日以降の増加は少なく、5日以降はほとんど増

Fig. 23. Change in configuration of leaf lettuce in long dark period. Figures indicate the number of days in dark.

まで減少し、この時間の長さは明期の光強度に依存すると報告した。本実験でも、

342, 516, 690, 864, 1038 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度で処理した。光強度は、陽光ランプの高さを変えて調節した。9時間光照射処理してから暗黒にし、このときの生体重を100として1, 4, 8および12時間後の生体重を相対値(%)で示した。光強度処理ごとに101から149 gの範囲の1個体を供試した。

実験結果

明期の光強度と暗期の生体重の変化との関係をFig. 24に示した。生体重は暗期間も増加し続けたが、始めの1時間の増加が特に大きかった。暗黒にして12時間以内の生体重の増加は、光が強いほど大きかったが、強光度では光強度を増した割合には生体重の増加は小さかった。そして、1038 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下では生体重の増加は飽和に達しなかった。

第3項 考 察

作物は暗期も生長を続ける。その点、生体重は光合成量と異なり、暗期の生長も表現できるという特徴をもつ。しかし、暗黒条件が長期間になれば徒長して正常な生育を維持できないことも知られている。したがって、生体重のモニタリングでは、暗期の扱い方について事前に検討しておく必要がある。

1週間暗黒条件とした場合の生体重の変化を測定した実験では、傾向的に見て始めの12時間の増加が大きく、3日以降の増加は少なく、5日以降はほとんど増加しなかった。Christ (1978a) は、コムギ葉の伸長が暗黒処理後14時間でほぼ0まで減少し、この時間の長さは明期の光強度に依存すると報告した。本実験でも、

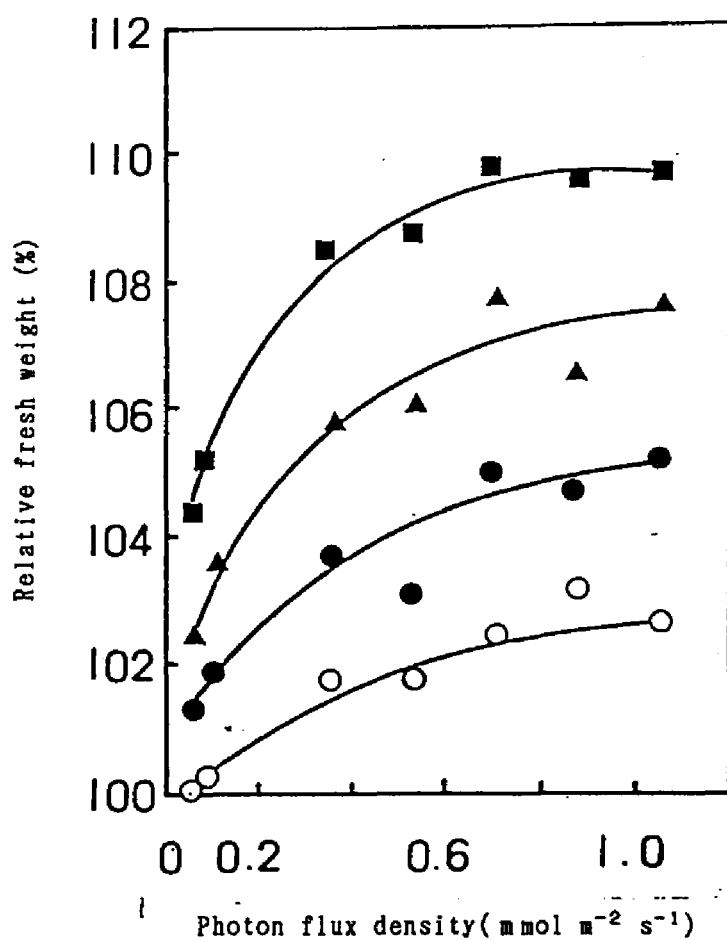


Fig. 24. Relationship between light intensity in light period for 9 hrs and increment of top fresh weight at first one(○), four (●), eight(▲) and twelve(■) hours in dark period. Relative values of the top fresh weight at the start of darkness are referred as 100 %.

同化産物を酸化して生長に必要なエネルギーに変換する過程で生じる呼吸は、生体重の増加とは逆に低下した。したがって、これを指標に考えれば、呼吸が低下し始めた12時間目に生長活性が低下し始めたと考えられる。また、生体重と呼吸をモニタリングした結果を比較してみると、全体の傾向として生体重の増加は呼吸に反比例することが分かる。すなわち、本実験の条件下では、暗期の開始後12時間で呼吸の基質となる同化産物が不足し始め、水耕養液の吸収が抑制されて生体重の増加速度が低下したと考えられる。

側面から見た個体の縦長／横長によって暗黒処理後2日から始まった縦方向の徒長的生長をとらえることができた。徒長的な生長が明確に現れるには、暗黒処理後2日を要したが、生体重の変化からは同化産物が不足して、徒長的生長に変わる時期が暗黒処理後12時間であることが分かった。すなわち、生体重のモニタリングによって、形態的な変化が現れないうちに徒長的生長の始まる時期を推測できる可能性が示された。

また、明期の光が強いほど暗期の生体重は大きく増加し、その光飽和点は1038 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とみられた。この明期の光強度と暗期における生体重の増加から求めた光－生体重増加曲線は、小田ら（1985）の報告したリーフレタスの光－光合成曲線に近似した。したがって、暗期開始直後の生体重は、明期に蓄えた同化産物の量に応じて増加したと判断された。

これらのことから、暗期に移してから12時間以内の生体重の増加は明期の光合成速度と比例関係にあり、長暗期の徒長的な生長も生体重の変化である程度区別

できる可能性が示された。

第4節 総合考察

作物生体重を連続測定した例は極めて少ない。したがって、①開発した装置で生体重を正しく計測できるか、②生体重によってどのような生長が分かるか、生体重と他の形質との関係はどのようなになっているか明らかにしておく必要がある。

まず、定植後の活着の時期を根の生理生態反応の面から検討して、一旦減少した生体重が増加に転じる時期がそれと一致することを明らかにした。したがって、生体重の長期計測で環境応答を調べる場合には、定植してから生体重が増加し始めるのを確認した後で実験を開始しなければならない。

次に、1作期間の生体重をモニタリングすると同時に解体調査などによって各種の生育指標を経時的に測定した。生体重の変化は、そのときの生育指標の変化によって説明できたことから、本装置によって1作期間の長期計測が可能であることが明らかになった。同時に、生体重と他の形質との関係が整理できたので、生体重を知ってその時の生育段階と他の形質をある程度推定できるようになった。

しかし、弱光条件などで徒長的に生長した場合には、生体重と他の形質との関係は変化する。すなわち、吸水生長が主体となった徒長的な生長とそれに同化産物の供給を伴った正常な生長を暗期の生体重の増加からは区別できないかもしれない。7日間暗黒処理した本実験結果では、暗黒にしてから12時間程度は生体重

が順調に増加し、その後はそれまで一定であった呼吸が低下することが明らかになった。また、暗黒処理後12時間までの生体重の増加は明期の光強度と比例関係にあった。Christ(1978a)は、夜間のコムギ葉の伸びが14時間で止まり、減少開始までの時間はその前の光強度によることを明らかにしており、本実験結果はこれに類似した。本実験の暗黒処理2日以降のリーフレタスの形態は縦長になり徒長傾向を示した。したがって、暗期の生体重の増加は明期に蓄積された同化産物の量に影響されるが、暗期間が長くなると吸水を主とした徒長的な生長が始まると結論される。

これらのことから、生体重の環境応答をモニタリングする際には、定植後一旦減少した生体重が増加に転じて、活着したことを確認してから処理を開始すれば、生体重の長期計測が可能である。また、暗黒処理後12時間程度までの生体重は、その直前に照射された光強度に比例して増加するが、それ以降は呼吸基質が不足した徒長生長によって生体重が増加し続ける。したがって、暗黒下の生体重のモニタリングでは、明期の環境条件を揃えるべきこと、逆に、一定の暗黒条件で処理後12時間以内に生体重を計測すれば、明期における同化産物の蓄積に基づく生長を推定できることが明らかになった。

第5節 摘 要

まず、水耕養液への定植から活着期までのリーフレタスの生体重、根の発育、

根の酸素吸収速度および根のTTC還元力の変化を調べて活着の経過のモニタリングの可能性と活着に要する期間を明らかにした。

気温20℃，相対湿度90±5%，光量子密度 $240 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の連続照明下では，定植後の生体重は一旦減少し，養液温度10，20および30℃でそれぞれ2，1および0.5日で増加に転じた。養液温度20℃では，定植後2日目からは水耕に特有な直線的で白くて長い根の発生が認められ，根量が増してT/Rが低下し始め，酸素吸収速度およびTTC還元力の増加段階が終了した。

次に，活着後から収穫までの間リーフレタスを生体重モニタリング装置で計測し，同装置による長期的なモニタリングの可能性を実証するとともに，他の生育指標と生体重との関係を明らかにした。

生体重は，17日間で4.4gから101gに増加し，その倍率は23倍であった。生体重モニタリング装置によってこの間の重量変化が連続的に記録でき，1日ごとの重量増加率の算出によって，計測始めから5日目前後および11日目以降の生育抑制が明らかになった。5日目前後は水ストレス状態の作物に特有の葉が横に広がった形状をしおり，蒸散速度が低下した時期に，また，11日目以降のそれは相互遮閉が始まる時期に一致した。これらのことから，本装置によって生体重の変化をモニタリングできることを確認するとともに，生体重の増加率が生長を表す一つのパラメータになり得ることが示された。生体重のモニタリングと平行して数日間隔で行った解体調査からは，生体重と葉数，葉面積，蒸散量，乾物率などとの関係が明らかになった。

暗黒下における生体重は12時間までは順調に増加し、その後は徐々に5日まで増加し続けて変化しなくなった。暗黒処理後2日で徒長的な形態変化を認めたが、生体重の変化を指標とすれば、徒長的な生長の始まる時期が暗黒処理後12時間であると推察された。これは、暗黒処理後12時間までの生体重の増加が明期の光強度に依存し、呼吸がこの時期から低下したことによる。

これらのことから、本装置によって生体重をモニタリングできることが明らかになった。正確なモニタリングを行うためには、活着までの数日間をその対象から外し、暗黒下では、それ以前の明期の同化産物の蓄積に応じて生体重が増加することに留意しなければならないことが明らかになった。

第3章 環境の変動に伴う生体重の一時 的变化

緒 言

作物の生体重などの生体情報は、主として解体調査によって収集されているため、電気計測技術の発達した環境情報と比較すると収集の速度が遅い。したがって、環境の変化に伴う生体重の短期的な反応を解析することは困難な状況にあった。

しかし、近年のセンサーおよびコンピュータ技術の発達は著しく、作物生育状態のモニタリングに可能性が出てきた。既に、植物の茎径 (Namken, 1969)、茎長 (鴨田・内藤, 1975)、葉身長 (Gallagherら, 1976)、果実長 (Holle・Scott, 1984)、生体重 (高辻ら, 1978)、葉色 (Eguchiら, 1979)、葉温 (橋本ら, 1979a)、形状 (Matsui・Eguchi, 1976) などの生体情報について、モニタリング装置の試作と若干の環境応答が報告され、現在も生体情報の収集に関する研究は盛んである。

これらのうち、生体重は、基本的な生長量の一つとして重要であり、玉木 (1983, 1984) は水耕養液を間欠的に給液して、シュンギクの地上部および全植物体重を歪ゲージの出力としてモニタリングした。しかし、生体重の環境応答については、詳細な測定例はほとんど無いのが現状である。

第1章では、モニタリングの対象を地上部に限定すると、生体重の連続測定が可能になることを明らかにした。この部位は葉菜類の収穫量に相当することから、連続測定が可能になれば、栽培管理のモニターとしての利用が期待される。そこで筆者は、計測の対象を地上部に限定して生体重のモニタリング装置を開発した。

第2章では、本装置を使って生体重の長期的なモニタリングを正確に行うための留意事項を検討した。その結果、開発した装置で生体重の長期計測が可能であり、その際には、活着までの数日間をモニタリングの対象から外すこと、並びに暗期の生体重の増加は明期の同化産物の蓄積に影響されることに留意しなければならないことを明らかにした。

本章では、環境変化に伴って変動し易いと考えられる生体重の一時的な変動の実態を明らかにし、これらの結果から帰納して、環境変化に伴う生体重の変動の原因を推定するとともに、計測上の誤差の防止法を検討する。これにより、作物生体重のモニタリング法を確立する。

このため、光、気温、湿度および風速を変化させて、地上部生体重をモニタリングした。とくに、生体重の変動が明瞭であった明暗変化を与えた場合については、蒸散速度および水分欠差の変化も測定して、環境変化に伴う生体重の変化の原因を検討した。

第1節 光の影響

光合成時には気孔が開いており、必然的に作物は体内水分を失って水ストレス状態になる。したがって、作物の生体重に及ぼす光の影響は大きいと考えられる。

そこで、明暗変化を与えた場合のリーフレタスの生体重、蒸散速度および水分欠差の変化を調べて、明暗変化がリーフレタスの生体重に及ぼす短期的な影響を明らかにした。

第1項 明暗変化による生体重の変化

実験方法

リーフレタス品種「グランドラビッド」の催芽種子をもみがらくん炭には種し、本葉1枚展開時に大塚ハウス肥料A処方の標準の1.5倍濃度養液に、株間15cmで定植した。養液への通気は、小型エアーポンプで常時行い、pHおよびECは、時々測定して、それぞれ5.3～6.3および3.0～3.7 mS cm^{-1} に調整した。地上部の環境は、気温 20 ± 0.5 °C、日長18時間、光量子束密度 $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (波長範囲400～700nm)、相対湿度65～80%とした。このような条件下で栽培したリーフレタスの中から生育中庸の3個体を選んで、3型の生体重モニタリング装置に定植した。3型装置は、発泡スチロール製の定植板を3個のロードセルで支え、出力される電圧をコンピュータ内蔵型レコーダ (横川北辰電機製YEW-3087) で重量に換算して、自動的に記録できる構造になっている。3個体はそれらの重心が定植板の中央に来るように、一辺が15cmの正三角形の頂点に配置した。定植後の環境は、特にことわらない限り栽培期間中のそれと同じにした。定植から3日が経過して生

体重の増加率が一定になってから、明暗処理を行った。明期の光量子束密度は $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （波長範囲400～700nm）とした。生育段階を異にして供試した3個体の平均葉数は、11、20および33葉であった。

実験結果

明暗変化を与えた場合の生体重の変化を生育段階ごとに測定して、Fig.25に示した。生体重は、暗期から明期に変わると一時的に減少し、逆の場合には一時的に増加した。この変化は、処理後30分以内にほぼ終了し、この現象は11および20葉期で同じであったが、33葉期では明期の後半における生体重の増加速度が低下した。

第2項 明暗変化による蒸散速度の変化

実験方法

電子上ざら天びん（島津製作所製ED-2000-10）に内径13.5cm、深さ7.5cmの円筒形ポットを置き、養液を1000 ml入れた。養液には、小型エアーポンプで通気した。通気量は、養液の飛沫および波がポットの外に溢れないように調節した。通気用ポリエチレンチューブの中央付近を支えてその重量が電子上ざら天びんに伝わらないようにした。6葉期の苗（葉面積 115 cm^2 ）5個体を株間6cmで定植板に移した。定植板は4つの台で支えて、根の浸った養液の重量だけが測定できるようにした。

上記と同一の条件で明暗変化を与えた場合の養液重量を10分ごとに読みとって、

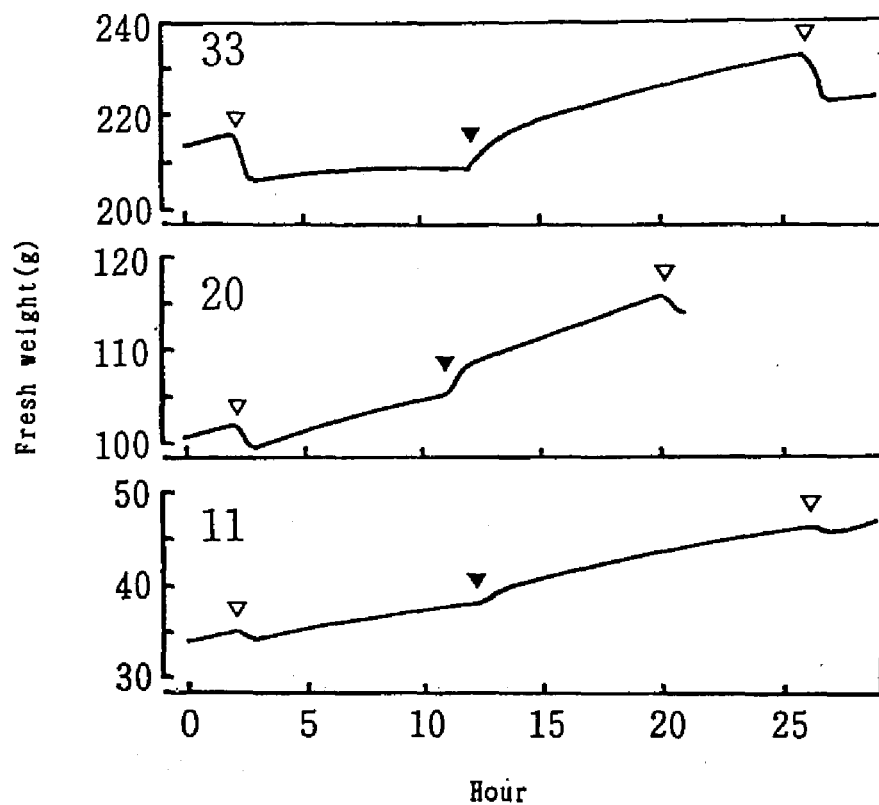


Fig. 25| Fluctuations in top fresh weight of leaf lettuce with 11(bottom), 20(center) and 33 true leaves(top) in the cycle of light and dark conditions. Air temperature was 20°C, and photon flux density was $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. ▽, light on; ▼, light off.

その減少量を蒸発散量とした。同時に作物を定植しない状態で養液重量の変化を測定して、明期および暗期の蒸発量を調べた。蒸散速度は、蒸発散量から蒸発量を差し引いた蒸散量を葉面積および時間で除して求めた。

実験結果

明暗変化による蒸散速度の変化をFig.26に示した。蒸散速度は、明期の $0.71 \text{ g dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ から消灯後20分で $0.25 \text{ g dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ まで低下し、点灯後1時間で最高の $1.23 \text{ g dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ まで上昇した後再び低下して $0.82 \text{ g dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ でほぼ安定した。

第3項 明暗変化による水分欠差の変化

実験方法

<実験1：葉の水浸漬後における生体重の変化> ‘グランドラビッド’を第2項の人工気象室内で栽培した。ただし、水分ストレスを与え易い条件として4号鉢に詰めた土壌で栽培し、調査の数日前から灌水を控えて作物に水分ストレスを与えた。生育中庸の11葉期のリーフレタス1個体を選んで解体し、即座に葉位ごとの生体重をひょう量した。ひょう量は、g単位とし、小数点以下第4位まで行った。次に、脱塩水に葉を漬けて、30分ごとに葉面に付着した水分をガーゼで拭き取ってひょう量し、再び脱塩水に浸けた。水分欠差は次式によって求めた。

$$WSD = 100 \times (SFW - FW) / (SFW - DW)$$

ここで、WSDは水分欠差(%)，SFWは飽水時生体重(g)，FWは生体重

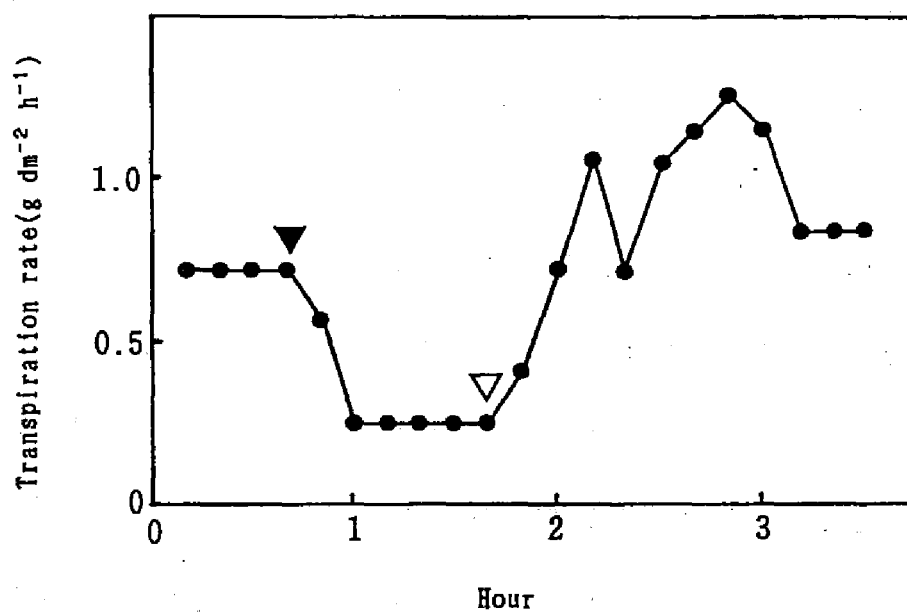


Fig. 26. Fluctuation in transpiration rate of leaf lettuce in the cycle of light and dark conditions. Air temperature was 20°C, and photon flux density was $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. ∇ , light on; \blacktriangledown , light off.

(g), DWは乾物重(g)を表す。

＜実験2：明暗変化による水分欠差の変化＞ ‘グラントラピッド’を第2項と同じ条件で水耕した。8葉期のリーフレタス8個体を同人工気象室の暗条件におき、4時間後に4個体の各葉の水分欠差を測定した。その直後に $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (波長範囲400～700 nm)の明期にし、1時間後に残った4個体の水分欠差を測定した。水分欠差は、葉を水浸漬してから30分後に測定した。

実験結果

水ストレスを与えたリーフレタス葉の水浸漬後における生体重の変化をFig.27に示した。第2葉以外の葉では水浸漬後30分の生体重の増加が大きく、その後も漸増した。しかし、第2葉では、変化が小さかった。

次に、明暗期におけるリーフレタスの水欠差をTable 10に示した。水分欠差は、明暗期とも葉位が上がるほど高くなり、第7および8葉のそれは高かった。第6葉までの水分欠差は、明期の方が暗期よりも高かったが、第7および8葉では、逆に暗期の水分欠差が高かった。

第4項 考 察

生体重は、明から暗への光条件の変化によって急激に増加し、約30分で増加速度が安定した。同じ条件で測定した蒸散速度も暗期に小さくなった。一方、最大葉付近までの水分欠差は暗黒下で小さくなったが、芯部では逆に大きくなった。生体重に占める割合の大きい最大葉付近までの水分欠差の影響により、個体レベ

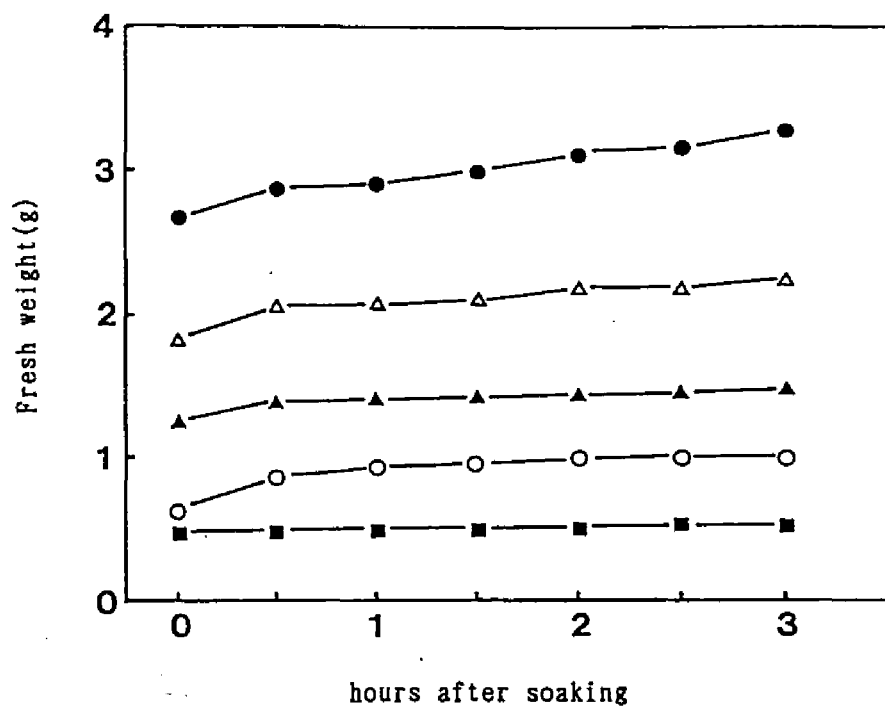


Fig. 27. Change in fresh weight of detached leaves in leaf lettuce after soaking the leaves in water. ■, ▲, △, ● and ○ show the 2nd, 4th, 6th, 8th and 10th leaf, respectively.

Table 10 Water saturation deficit(WSD) of leaf
lettuce in dark and light period.

Position of leaf	Average fresh weight ^a (g)	WSD (%)	
		Dark	Light
2	0.27	1.50±0.47	2.48±0.37
3	0.48	1.60±0.24	2.55±0.59
4	0.81	1.65±0.27	2.50±0.40
5	1.41	1.75±0.28	2.10±0.27
6	1.28	1.88±0.44	2.13±0.35
7	0.46	4.18±0.85	3.98±0.55
8	0.08	7.20±1.64	6.93±0.83

Data are shown as the mean±SE.

^a after the soaking in water for 30 minutes.

ルの生体重は暗黒下で大きくなった。逆に、暗から明への光条件の変化では、蒸散速度と水分欠差が大きくなり、生体重が減少した。Miller・Langhans (1985) は、本実験と同じ品種‘グランドラビッド’を供試して、暗黒処理すると水蒸気拡散抵抗が急激に増大して蒸散速度が急激に低下し、明条件ではこの逆になるという本実験と同じ結果を報告した。関山ら (1978) は、茎径が暗明によって膨縮することを明らかにしたが、生体重の変化はこれと似たものであった。長野・島地 (1976) によって茎径の変化と作物の水分状態の関係が明らかにされ、本実験で調べた水分欠差も平沢・石原 (1978) によって水ポテンシャルとの間に直線関係のあることが明らかにされている。これらのことから、暗から明への光条件の変化によって蒸散速度が増加するため、作物体内水分が減少して生体重が減少し、明から暗への光条件の変化ではその逆になると考えられる。

暗から明への光条件の変化によって生体情報に変化が認められた後、それが安定するまでの時間は、1時間以内である例がいくつか報告されている。関山ら (1978) は、茎径の反応遅れがゴムで約1時間、ミカンとケヤキで約20分であったと報告し、Cutlerら (1980) は、イネの葉の伸長が点灯直後から減少し始め、15～60分で安定し、消灯直後からは急激に増加して、30～60分で安定したとしている。Ishikawaら (1983) は、明暗変化による膜電位の変化が20分程度で安定することを明らかにした。これらの結果を勘案すると、本実験で認められた明暗変化後の生体重の安定に要する時間約30分以内は妥当な結果と考えられる。

第2節 気温の影響

第1節では、生体重が蒸散速度に影響されて変動し易いことを明らかにした。本節では、気温が生体重に及ぼす一時的な影響を明らかにしようとするが、気温を変化させると、蒸散速度への影響の大きい湿度も変化する場合が多いので、湿度の影響を除去して気温だけの影響を摘出する必要がある。

このため、相対湿度一定または飽差一定下で気温を変化させた場合のリーフレタス生体重をモニタリングして、気温が生体重に及ぼす一時的な影響を明らかにした。これにより、生体重の高精度なモニタリングに際して留意すべき温度要因の取扱い方を検討した。

第1項 相対湿度一定下の気温変化が生体重に及ぼす影響

実験方法

‘グランドラビッド’を第1節第1項と同じ条件で栽培し、環境制御室（小糸工業製 小糸トロン3HS-特殊型）内に置いた3型のモニタリング装置に定植した。3個体を供試し、それらの重心が定植板の中央に来るように一辺が15cmの正三角形の頂点に配置した。処理中の環境条件は、相対湿度70～85%，光量子束密度 $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした。気温は、20，5，20，35，20℃の順に変化させ、比例制御により1時間かけて所定の気温に設定した。設定温度には5時間遭遇させた。供試した作物は6葉期であった。

実験結果

相対湿度一定の条件下で気温を20℃から急激に低下または上昇させた場合の生体重の変化をFig.28に示した。気温が急激に低下している間の生体重の増加速度は一時的に上昇し、逆の場合には、一時的に低下した。その程度は、高温側で変温した方が低温側で変温するよりも大きかった。また、20℃における生体重の増加速度は、低温の後よりも高温の後の方が著しく大きかった。

第2項 飽差一定下の気温変化が生体重に及ぼす影響

実験方法

第1項と同じ条件で栽培した‘グランドラビッド’を光量子束密度 $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (波長範囲400～700 nm) の環境制御室に入れ、気温を25, 35, 25℃の順で変化させた。その間の空気湿度は、飽差0.6kPa以内に制御した。

実験結果

空気中の水蒸気の飽差をできるだけ小さくして変温した場合の生体重の変化をFig.29に示した。変温の直後に生体重の一時的変化が認められたが、生体重はすぐに変温する前の重量に戻って一定の速度で増加した。すなわち、変温に伴う環境制御の乱れが除かれた後では、生体重の一時的な変化はほとんど認められなかった。

第3項 考 察

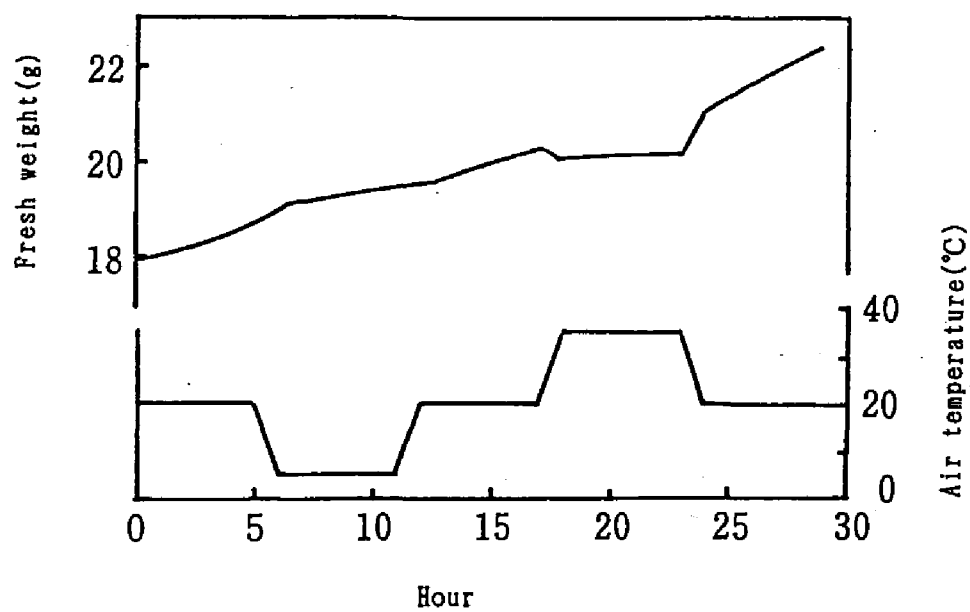


Fig. 28. Fluctuation in top fresh weight of leaf lettuce by the change of air temperature under a constant relative humidity($77 \pm 8\%$). Photon flux density was $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

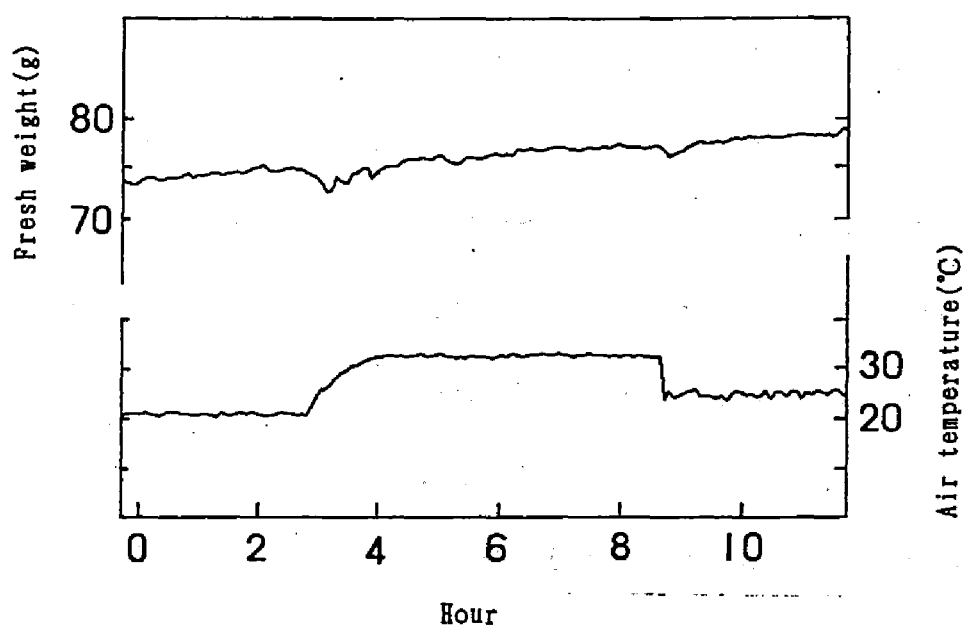


Fig. 29. Fluctuation in top fresh weight of leaf lettuce by the change of air temperature under a constant condition of vapor pressure deficit(0.6 kPa). Photon flux density was $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

相対湿度を一定にして変温すると、昇温時には生体重が減少し、降温時には増加した。しかし、飽差が一定の場合には変温による生体重の一時的増減はほとんど認められなかった。Raschkeら（1986）は、変温条件下ではストロベリーツリー（*Arbutus unedo* L.）の光合成および蒸散速度が主に飽差の影響を受け、約 2 kPa 以上で急激に低下すると報告した。これらのことから、飽差一定条件では変温しても蒸散速度が一定に保たれるのに対して、相対湿度一定条件では高温で飽差が大きくなり、蒸散速度が増大して生体重が減少し、あたかも気温の影響で生体重が一時的に変動したように見えると考えられる。また、Shackel・Brinckmann（1985）は、飽差を1.3 kPaから0.5 kPaに低下させるとムラサキツユクサの蒸散が減り、葉温が高くなり、表皮細胞の膨圧が高くなると報告している。

これらのことから、生体重に及ぼす気温の影響を正しくモニタリングするためには、気温を変化させた後も飽差を一定に保つことの重要性が明らかになった。

第3節 湿度および風の影響

第1および2節の結果からは、蒸散速度の変化によって生体重が増減する可能性が示された。したがって、空気湿度の低下および風速の増加は蒸散速度を増して、生体重を減少させると考えられる。

そこで、本節では湿度を変化させた場合の生体重、蒸散速度、葉温および光合成速度の変化並びに風速を変えた場合の生体重の変化をモニタリングして、生体

重のモニタリングにおける湿度および風の取扱について検討した。

第1項 湿度の変化が生体重、蒸散速度、葉温および光合成速度に及ぼす 影響

実験方法

第1節第1項と同じ条件で栽培したリーフレタスを3型装置の定植板中央に定植した。ただし、養液槽の大きさは1/5000ワグナーポットとし、恒温循環器は外し、小型エアーポンプによる通気だけを行った。これをFig.30に示した50cm四方の透明アクリル製同化量測定装置に入れた。光強度は陽光ランプの照射により $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、温度は25℃とした。同化量測定装置に入れる空気は一旦、ビニル製バッグに貯めた後、水中を通過させて加湿してから冷却フィンを通して除湿し、相対湿度80%（飽差0.63kPa）、55%（同1.43kPa）、90%（同0.32kPa、3.2mb）の順で制御した。空気流量は 20 l min^{-1} とした。同化箱出入口の炭酸ガス濃度および水蒸気量を赤外線ガス分析計（富士電機製 ZAP-2型）で測定し、光合成量および蒸散量を算出した。ただし、蒸散量は蒸発散量から作物を定植しないで測定した養液面からの蒸発量を差し引いて求めた。光合成速度および蒸散速度は、実験終了時に測定した葉面積と時間で光合成量および蒸散量を除して求めた。蒸散量を測定するための空気をガス分析計に送るための管は、40～50℃に加湿して水蒸気の凝結を防いだ。

葉温は、直径 0.1mmの銅-コンスタンタン熱電対を最大葉の裏に貼着けて測定

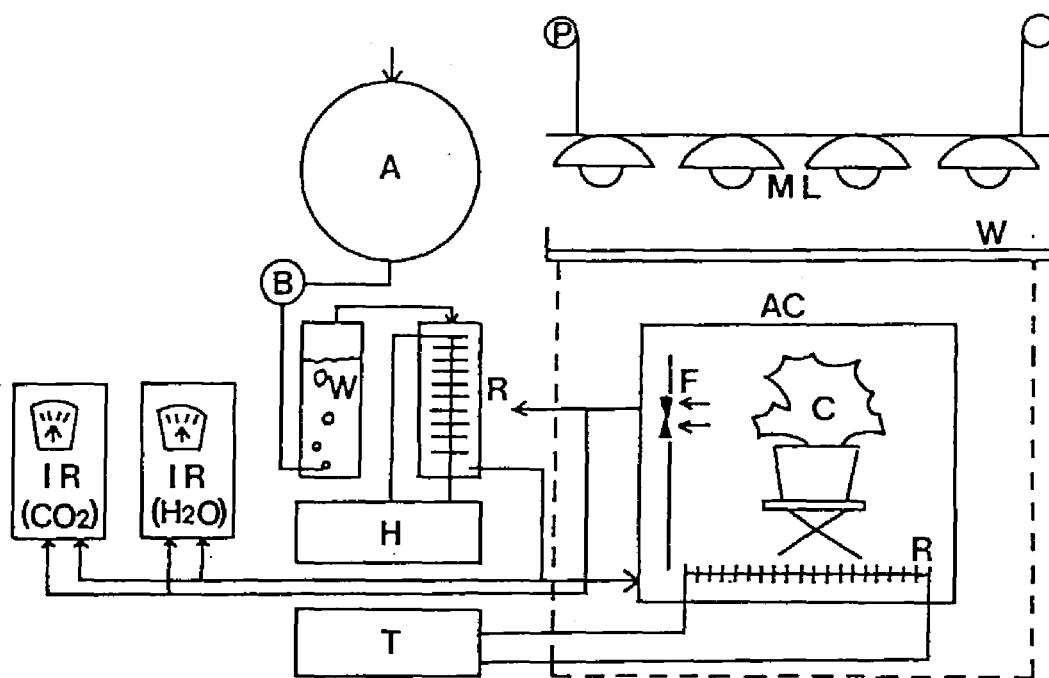


Fig. 30. Diagram of measuring system for photosynthesis. Arrows indicate air flow. A, air bug; B, blower; W, water; R, radiator; H, humidity controller; T, temperature controller; AC, acrylic chamber; F, fan; IR, infrared gas analyzer; P, pulley; ML, metalhalide lamp; C, crop.

した。湿度は、乾湿球温度を測定し、その温度差から算出した。

実験終了時の作物の生体重は、葉、茎および根がそれぞれ20.1, 0.79および3.91 g, 葉数は11枚, 葉面積は640cm²であった。

実験結果

気温を一定にして相対湿度を変えた場合の生体重、蒸散速度、葉温および光合成速度を同時計測して、Fig.31に示した。相対湿度80, 55および90%における生体重の増加速度は、それぞれ0.50, -0.01および0.60 g h⁻¹となり、湿度の降下中および上昇中のそれは-0.50および2.10 g h⁻¹であった。また、蒸散速度は、相対湿度80, 55および90%でそれぞれ0.15, 1.07および0.36 g dm⁻² h⁻¹であった。相対湿度80および90%の場合の葉温は、それぞれ雰囲気温度よりも0.5および1.7℃高く、相対湿度55%のそれは逆に-0.1~-0.5℃低かった。光合成速度の変化は、処理の約30分後に検出でき、相対湿度が低い間の光合成速度は小さかった。

第2項 風の有無が生体重に及ぼす影響

実験方法

第1節第1項と同様にして栽培した収穫期のリーフレタス1個体を気温25℃, 相対湿度70%の環境制御室に置いた3型装置に定植し、光量子束密度136 μmol m⁻² s⁻¹で常時照明した。3日後に、相対湿度を55%にし、風速を0, 0.5および0 m s⁻¹の順で数時間ごとに交えて生体重を連続測定した。

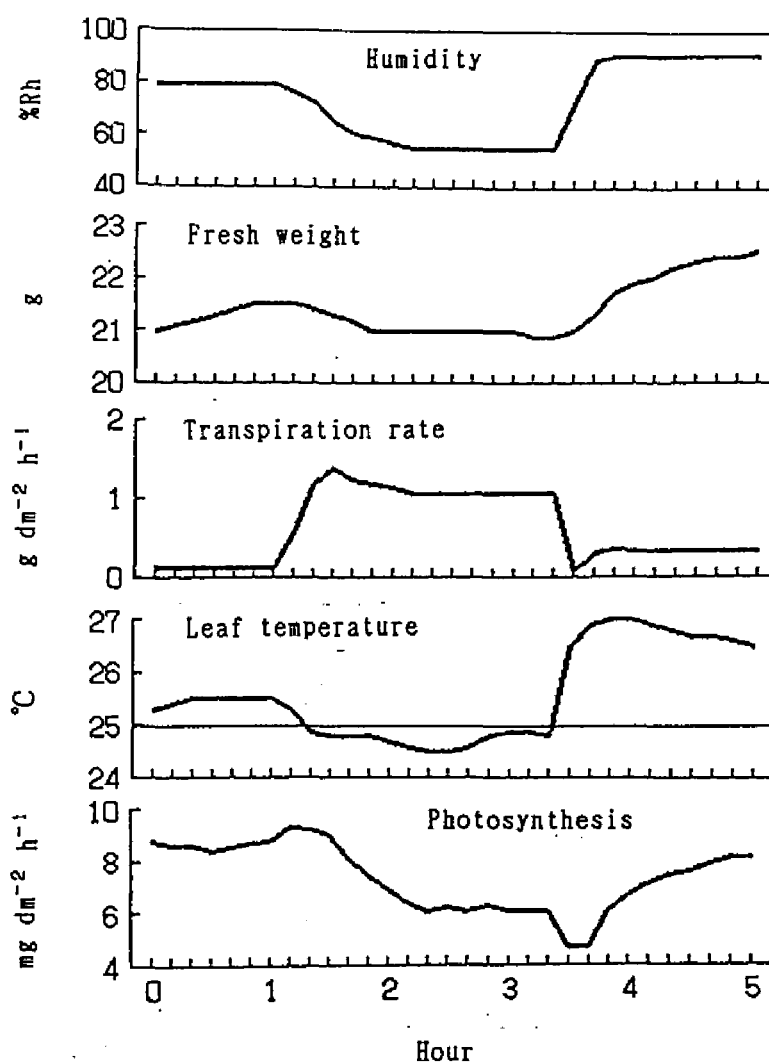


Fig. 31. Simultaneous measurement of top fresh weight, transpiration rate, leaf temperature and photosynthesis of leaf lettuce at 25 $^{\circ}\text{C}$ of air temperature, when the relative humidity was changed.

実験結果

温湿度を一定にして風速を変えた場合の生体重の変化をFig.32に示した。風速が速くなるときには、生体重は一時的に減少し、逆の場合には増加した。しかし、風速 0 および 0.5 m s^{-1} で一定の間の生体重の増加速度はほぼ同じであった。

第3項 考 察

気温一定で相対湿度が低下および上昇する間の生体重は、それぞれ減少および増加した。相対湿度が低い間は、蒸散速度が大きく、それを反映して葉温は低くなり、光合成速度は小さくなった。新井ら (1985a, 1985b) は、トマトおよびキュウリの光合成速度が相対湿度60および80%以下になると低下し始めることを、Tibbitts・Bottenberg (1976) は20°Cにおけるサラダナの生長が相対湿度85%の方が50%よりも優れることを明らかにした。また、Bunce (1987) は、飽差を1.0 kPaから2.5 kPaに増すと、約10分間のタイムラグの後にダイズの気孔伝導度と光合成速度が低下し始めること、石原・黒田 (1986) は、飽差が大きくなるとイネ葉身の気孔開度、拡散伝導度および光合成速度が減少し、蒸散速度は飽差1.1 kPaまでは飽差が大きいほど増大することを明らかにした。したがって、本実験の低湿時の相対湿度55%は、光合成に至適な湿度よりも低かったと考えられた。

次に、相対湿度55%で 0.5 m s^{-1} の風速を与えると、生体重が減少した。風によって葉面境界層が取り除かれることになるから、当然蒸散は増えていると考えられる。風による生体重の減少は、風が強い日の作物が萎凋する事実にも合致す

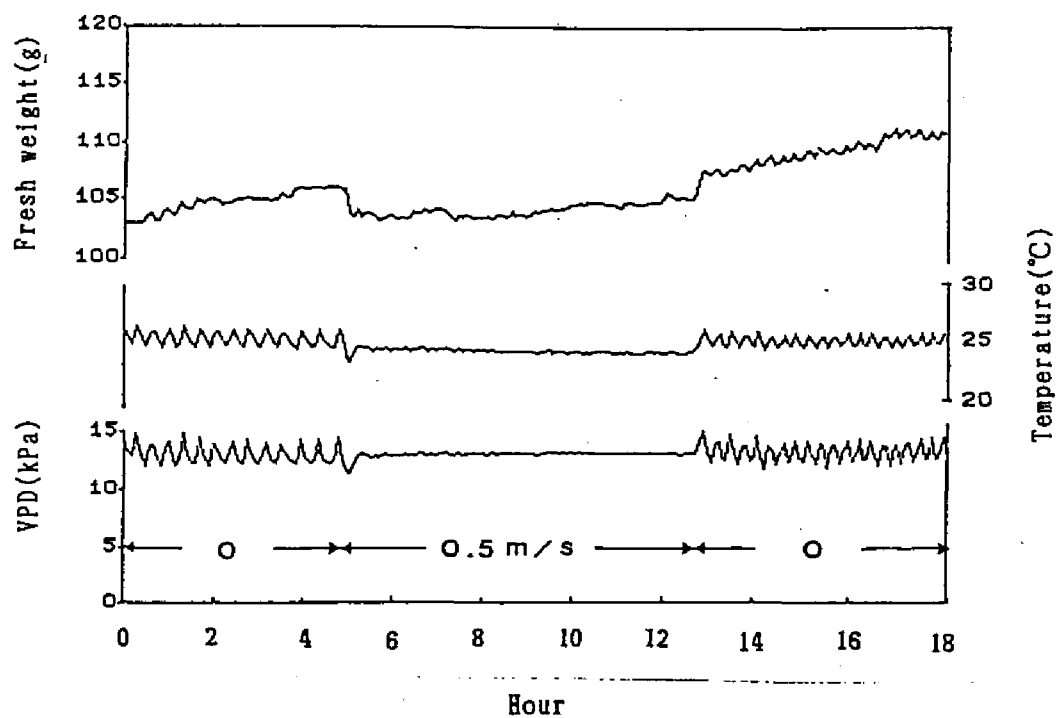


Fig.32. Fluctuation in top fresh weight of leaf lettuce by the change of wind velocity under constant air temperature and VPD(vapor pressure deficit). Figures and arrows show the wind velocity and its term.

る。

これらの結果から、空気湿度の低下および風速の増大といった蒸散速度が増大する条件では、生体重が減少すると判断された。

なお、ここで用いた生体重、蒸散、光合成の同時モニタリングは、ここ1～2年の間に関心が高まっている。高橋ら（1987）は、光合成、蒸散、葉温と環境条件、池田ら（1987）は光合成、生体重の同時連続計測システムを開発して、作物生長反応の解析に利用しようとしている。このような装置の開発と応用は今後の発展が期待される研究課題である。

第4節 総合考察

明暗変化、気温、空気湿度および風速を変化させた場合の生体重をモニタリングし、それぞれの結果から帰納して、生体重が一時的に変動する原因を推定した。

生体重は、暗から明への光条件の変化で減少し、相対湿度一定条件で気温を上昇させると減少したが、飽差一定における昇温ではほとんど変化しなかった。また、空気湿度を低くするか風速を増すと生体重が減少した。このように、生体重は、いずれの場合も環境条件の変化によって一時的に変動した。個々の事例は以下のように解釈できる。

明暗変化による生体重の変動は、蒸散速度の違いによって説明できる。すなわち、暗黒条件を与えると蒸散速度の低下によって植物体内の水ポテンシャルが上

昇して生体重が増加するの対し、光を照射すると蒸散速度の上昇によって水ポテンシャルが低下して生体重が減少すると考えられる。

気温については、高温で変化した場合の生体重の変動が大きかった。高温では、葉温を低くするための蒸散が盛んになること、並びに低温の場合よりも飽差が大きく、空気湿度の面からも蒸散が増加する条件にあったことが、この原因と考えられる。このことは、飽差一定条件で変温した場合には生体重がほとんど変化しなかったことから明らかである。また、蒸散の指標となる葉温でも、本実験結果の妥当性を示唆する同様の結果が得られている (Matsui and Eguchi, 1971)。

湿度を上昇させると、蒸散速度が低下して植物体内の水ポテンシャルが上昇し、生体重が増大する。特に湿度が上昇している間は、低湿時の蒸散速度に応じた高い吸水速度が継続しているにもかかわらず、湿度の上昇によって蒸散速度が急激に低下するため、両者の均衡が変化して、生体重の増加速度が著しく高くなると推察される。

風速を増すと、生体重が減少した。風が葉面境界層を取り除くことになり、蒸散速度が増大して、水ポテンシャルが低くなると考えられる。

以上の共通点は、蒸散速度が大きくなる条件では生体重が減少し、逆の場合には増加するということである。Greenら (1971) は *Nitella* の葉の膨圧と伸長の比例関係を、Christ (1978b) は光変化によるコムギの蒸散速度と水ポテンシャルについて、Aston・Lawlor (1979) はトウモロコシの蒸散速度と葉の水ポテンシャルについてともに反比例的な関係にあることを明らかにした。作物の生体重の94

%は水分で占められているという事実 (Table 9) も考え合わせると、環境の変化による生体重の一時的な変化は、作物体内水分の増減に起因すると考えるのが妥当であろう。すなわち、蒸散が盛んになると根からの水分吸収との均衡状態が変化して生体重は減少し、その逆の場合には増加すると思われる。

以上のことから、環境の変化によって生体重は一時的に変動することが明らかになり、この変動は、植物の水分状態の違いに基づくものと推論された。すなわち、生体重の変化には、物質生産を伴った生長による長期的かつ不可逆的な変化と、環境の急変による短期的かつ可逆的な変化が混在していることが示唆された。したがって、生体重のモニタリングの際には、蒸散速度を一定にするような環境条件を設定して、後者の変化による計測誤差を消去しなければならないことが明らかになった。

第5節 摘 要

環境条件の変化に伴う生体重の一時的な変動の実態を明らかにし、これらの結果から帰納して、環境変化に伴う生体重の変動の原因を推論した。これに基づき、生体重のモニタリングの精度の向上について検討した。

光の照射、気温の上昇、湿度の低下および風速の増加によって生体重が一時的に減少し、逆の場合には増加した。その変化には、30分以内の時間を必要とした。明から暗への光条件の変化では、蒸散速度と水分欠差が増大した。また、昇温中

の生体重は、相対湿度一定では減少したのに対し、飽差一定ではほとんど変化しなかった。

これらの結果から帰納して、生体重の蒸散速度が変動するような条件下では、体内水分状態が変化して、生体重が一時的に変動すると考えられた。したがって、生体重のモニタリングの際には、蒸散速度を一定にするような環境条件を設定して、一時的な変化による計測誤差を消去しなければならないことが明らかになった。

第4章 生体重のモニタリングによるリ ーフレタスの至適環境の推定

緒 言

施設園芸における環境制御技術が高度化、重装備化するに伴い、栽培施設内の環境はかなりの精度で制御できるようになった。この究極に野菜工場がある。太陽光を利用する施設では、日射の変動に影響されて、光強度、温度、湿度などの環境要因を常に作物に最適に維持することが困難であり、今なお、日射に応じた環境制御のソフトウェアの整備が不十分である。野菜工場でも、その能力を十分に発揮させ得るような精緻な栽培ソフトウェアは無い。したがって、いずれの生産現場でも試行錯誤を繰り返しながら個別に栽培ソフトウェアを開発しているのが現状である。

重装備化された野菜生産方式は、ビタミン、ミネラルなどの栄養素や食物繊維を周年・安定的に供給して食生活の質的向上に貢献しているが、今のところ生産コストが高いため、経営に失敗する例もある。しかし、この問題は収益性の高い野菜の選択と精緻な栽培ソフトウェアの開発によって解消されと考えられる。

収益性の高い作物として具備すべき条件としては、①生育が速く、短期間で収穫でき、施設の利用効率が高いこと、②作物の収穫部分の割合が高く、エネルギーの利用効率が高いこと、そして、③収穫物の単価が高いことなどが考えられる。

既設の野菜工場に主として導入されているサラダナおよびリーフレタスはこれらの要件に合致していると推察される。

ところが、栽培の至適環境に関する研究は、サラダナを対象としたものがほとんどで、リーフレタスの研究は少ない。両者は、それぞれレタスの一タイプに属するものの光合成特性の異なることが明らかになっており（小田ら、1985）、リーフレタスの生育特性をサラダナのそれで代用することはできない。したがって、リーフレタスの環境－生長反応を解析し、そのデータベースを作成できれば、重装備化された施設を効率的に運用するための栽培ソフトウェアを開発できると考えられる。

このための指標として、光合成速度は計測の迅速性において優れている。しかし、収穫物の95%程度を水分が占めるリーフレタスなどの野菜では、光合成速度など乾物生産に関する指標だけで生長反応が十分に解析できるとは考えられない。したがって、生体重の面からの環境－生長反応の解析も必要である。そして、生体重の変化でみた生長の解析結果の利用によって、新しい栽培ソフトウェアの開発も可能になると考えられる。

本章では、段階的な変温条件下の生体重増加率から生長速度を迅速に推定する方法を開発し、これによる環境－生長反応データベースのプロトタイプを作成して、野菜の特性を生かした新しい栽培法の可能性を検討する。

このため、まず変温に付随する生体重の変動の補正または消去法を明らかにした。次に、生体重の増加率と光合成速度で見た温度・光－生長反応曲線を作成し

て両者の違いを比較・検討して、リーフレタスの栽培に適した環境を推定した。
続いて、得られた結論を実証するために、自然光下の栽培条件で遮光および加温
による生長の促進効果を検討した。

第1節 至適気温の推定法の開発

第3章では、光、気温などの環境条件の変化がリーフレタスの生体重を一時的
に変動させることを明らかにした。このことから、生体重の変化の中には、生長
それ自体を示す不可逆変化と、環境の変化に伴って一時的に変動する可逆変化が
混在し、生体重のモニタリングにおける攪乱要因になっていることが示唆された。

そこで、可逆変化を補正または消去できれば、生体重の変化によって作物の生
長変化だけを取り出すことができると考えられた。そして、生育段階の違いを無
視し得る程度の短期間に同一個体を処理して生体重の変化が精度よく検出できれ
ば、その増加率を指標として至適環境の迅速な検索が可能になり、環境条件と生
長との関係の体系化に寄与すると思われた。

このため、本節では相対湿度または飽差一定の条件下で気温を段階的に変化さ
せ、各温度ごとの生体重の増加率による至適環境の迅速な推定を試みた。その際、
環境の変化による生体重の一時的な変化の影響を補正または除去するための方法
についても検討した。

第1項 相対湿度一定条件における至適気温

実験方法

1985年12月20日、品種‘グランドラビッド’の催芽種子をもみがらくん炭には種し、無加温ガラス室のポリエチレントネル内に置いた。翌年1月6日に本葉展開始めの苗をウレタンキューブにはさんで水耕養液に仮植し、同施設内の自然光下で水耕した。同月19日に本葉3枚の幼植物7個体を大塚ハウス肥料の1および2号によるA処方養液に定植した。濃度は標準の1.5倍とした。植物体は中心に1個体とその周りに中心角60°で等間隔に配置し、株間はすべて8cmとした。地上部生体重は、3型の装置で測定した。すなわち、発泡スチロール製定植板を最大荷重50gのロードセル（共和電業製120T-50B）3個で支え、養液を入れた1/2000aのワグナーポット上に置いた。ロードセルへは安定化電源で3Vの印加電圧を与え、出力される信号をアナログ記録計（横川北辰電機製YEW-3097）で記録し、生体重に換算した。養液への通気は小型エアーポンプで行った。これらをコンピュータ制御の環境制御室（コイトロン3HN-35DA特殊型）内に置いた。

定植後12時間は暗黒、その後は常時照明下で栽培した。2日間は20℃とし、3日目に生体重が再び増加し始めたのを確認してから12時間ごとに気温を変えた。段階的な変温は、5℃から始め、5℃刻みで上昇させ、35℃に達した後は同様に低下させた。変温には30分を要し、この間の気温は時間に比例して変化させた。その後11時間30分の気温は設定値 ± 0.5 ℃で制御した。養液温度は、 25 ± 2 ℃で制御した。

水耕リーフレタスの生体重は明暗および温度変化の影響が大きかった（第3章第1節および第2節）ので、本実験は、明暗変化の影響を無視し得る条件として光量子密度 $295 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の連続光下で行った。

環境制御室内には $12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ の外気を取り込んで二酸化炭素を供給した。そのほか、相対湿度は加湿制御によって $73 \pm 8 \%$ 、養液温度は $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ とした。

生体重の増加率は、次式によって算出した。

$$\text{GR} = 1/W \cdot dW/dT$$

ここで、GR：生体重の増加率 $[\% \text{ dT}^{-1}]$ ，W：時刻 t における生体重 $[\text{g}]$ ， dW ：時間 dT における生体重の増加 $[\text{g}]$ ，である。

処理終了時の葉数は、6枚であった。

実験結果

Table 11は、気温を12時間ごとに段階的に変化させた場合の生体重の変化である。生体重が安定して増加したのは変温開始1時間後から12時間後であったので、その時間の測定値を示した。昇温開始1時間後の生体重はいずれも減少し、逆に、降温開始1時間後のそれは著しく増加した。

まず、Table 11の変温開始時、すなわち生体重が環境の変化によって一時的に変化している時点のデータを使って、変温の影響を補正しない場合の気温と生体重の増加率との関係をFig.33に示した。いずれの気温でも降温過程の生体重増加率の方が昇温過程のそれよりも高かった。

次に、変温開始後1時間の重量変化を差し引いて補正した場合の気温と生体重

Table 11. Change in top fresh weight of leaf lettuce. The air temperature was controlled stepwise at the indicated level in every sequent 12-h interval. The light intensity was constant during the 6-d experiment. The figures denote the average fresh weight of 7 plants at 1 and 12 hours after temperature change.

Temperature (°C)	Fresh weight (g)	
	1 h	12 h
5	—	7.98
10	7.89	8.40
15	8.32	9.00
20	8.83	10.10
25	10.02	11.54
30	11.38	12.90
35	12.73	14.35
30	15.03	17.49
25	18.08	21.65
20	21.99	25.72
15	26.06	28.69
10	28.86	31.24

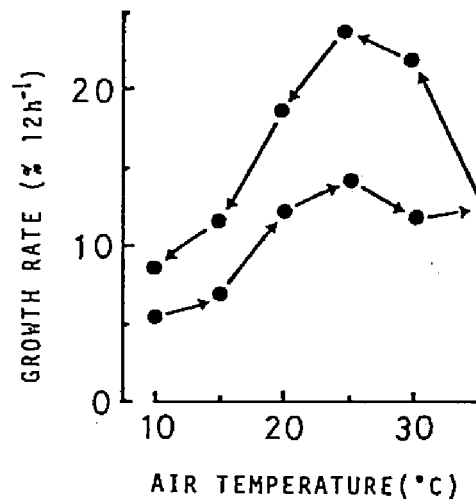


Fig. 33. Dependence of the growth rate of top fresh weight of leaf lettuce during each 12-h control interval on the air temperature. The rate was calculated from Table 11. Arrows indicate the course of the temperature change.

増加率との関係をFig.34に示した。この結果、高かった降温過程の生体重増加率が低くなって昇温過程のそれに近づいた。また、生体重増加率が最高になる気温は、両過程とも25℃で一致した。

第2項 飽差一定条件における至適気温

実験方法

‘グランドラビッド’を気温20℃、相対湿度70～85%，光量子束密度 $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （陽光ランプ）で常時照明して育てた。本葉3枚展開時の生育中庸の苗1個体を3型装置に定植した。定植後は、飽差の変化をできるだけ小さくする条件として、飽差0.4 kPa以内を保つように加湿制御した。光量子束密度 $155 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で3日間経過させ、この条件のまま12時間ごとに気温を15℃から5℃ずつ上昇させ、35℃からは再び段階的に低下させて、各温度ごとの生体重の増加率を求めた。養液の条件は第1項と同じとし、処理終了時の葉数は、6枚であった。

実験結果

飽差0.4 kPaの湿度条件で12時間ごとに変温した場合のリーフレタス生体重の増加率をFig.35に示した。生体重増加率の最高は、昇温および降温過程で、それぞれ25および30℃であった。両過程とも生育が進むほど生体重増加率が高い傾向にあった。

第3項 考 察

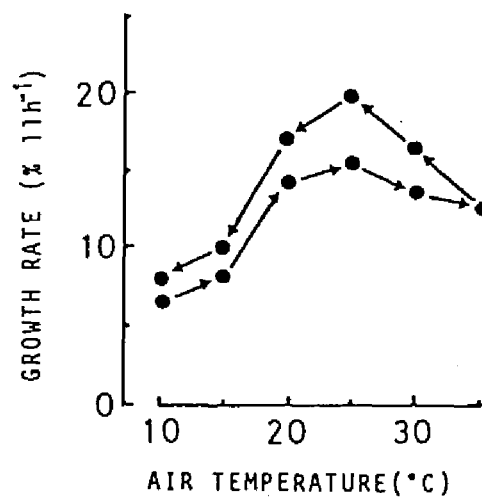


Fig. 34. Relationship between air temperature and the growth rate of top fresh weight of leaf lettuce during the last 11-h in each 12-h control interval. The first 1-h change of fresh weight was excluded from the results shown in Fig. 1, since it was affected by the temporal response of crops after a sudden temperature change.

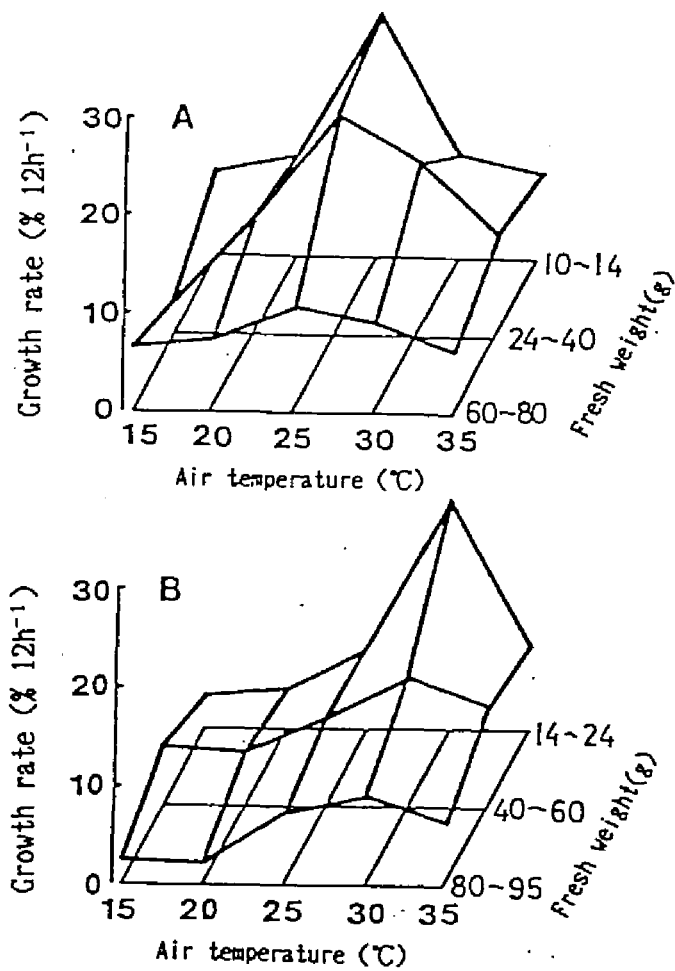


Fig. 35. Twelve-hourly mean growth rate of fresh weight in leaf lettuce as functions of air temperature and growth stage showed by fresh weight. Air temperature was changed stepwisely every 12 hours. Water vapor deficit was kept within 0.4 kPa. A and B had low and high career temperature.

相対湿度を一定にして、段階的に変温すると、昇温開始1時間後の生体重は常に減少し、逆に、降温開始1時間後のそれは著しく増加した。変温には30分を要したので、一定の温度になってから生体重の一時的変動がなくなるまでの時間は、30分以内であった。これは、第3章第2節第1項で認められた現象と同じであった。この変温始めから次の変温までの12時間の各気温の生体重増加率 (Fig.33) は、降温過程の方が昇温過程よりもかなり高かった。このようなヒステリシスは、エンドウの軸伸長でも認められている (Hole・Scott, 1984)。

次に、ヒステリシスと見られる現象がデータの処理によって消去できるか検討した。変温時の影響を補正するために、変温開始から1時間の生体重の変化を差し引いて、その後の11時間の生体重増加率 (Fig.34) を算出した。すると、降温過程の生体重増加率は低下して、昇温過程のそれに近づいた。また、生体重の増加率が最高になる気温は、補正前には昇温過程で25°C、降温過程で30°Cであったが、補正後は両過程とも25°Cで一致した。これらのことから、ヒステリシスと見られた現象は、変温時の一時的な影響が主因であり、その間のデータを除外して補正することによってある程度は消去でき、その結果、生体重の測定精度を向上できることが明らかになった。

しかし、昇温過程と降温過程における生体重量の増加率は、変温による影響の補正後も完全には一致しなかった。レタスの光合成速度には前歴効果が存在し (Lorenz・Wiebe, 1980)、段階的な変温条件におけるトマトの水ポテンシャルでも生体重の増加率と極めてよく似たヒステリシスの存在が認められている (荒木,

1985) ことから、補正後の昇温および降温両過程の生体重増加率曲線の差異は、温度前歴の影響によるヒステリシスも一因と考えられる。

第3章第3節第1項では、湿度の低下によって生体重が減少し、逆の場合には増加することを明かにし、それが蒸散速度の増減に起因すると推察した。本節第1項の実験では、相対湿度は $73 \pm 8\%$ でほぼ一定としたが、飽差に換算すると 15°C では 0.46 kPa 、 35°C では 1.52 kPa となり、蒸散に対する影響が大きく異なる。したがって、気温が上昇すると飽差が大きくなり、蒸散が増し、生体重が減少する。このため、生体重の増加率は昇温時には見かけ上低くなり、逆の場合には高くなったと考えられる。

そこで、基本的には蒸散速度の変化を抑制することが大切と考えて、飽差を 0.4 kPa 以内で制御して、段階的な変温を行った。その結果、変温直後の生体重の変動はほとんどなくなり、生体重の増加率は昇温過程では 25°C 、降温過程では 30°C で最も高くなった。この場合、加湿制御を行ったので、昇温時の飽差は 0.4 kPa になったが、降温時の飽差は環境制御室の壁面に結露する程度に低くなった。これが、昇降温両過程における至適温度の違いの一因と考えられるが、前歴の影響の存在が否定された訳ではない。

池田ら(1984)が、連続照明、気温 18 、 22 、 29 および 32°C の条件でサラダナを14日間栽培した結果では、生体重の増加速度は、光量子束密度 $85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ では 26°C 、 $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ では 29°C で最高になった。これは、段階的な変温による本実験結果とほぼ一致している。

以上のことから、段階的な変温下の生体重増加率からリーフレタスの至適気温を3日間で推計できると判断された。環境条件を変えたときの生体重の一時的な変動を完全に補正できて測定精度が向上すれば、至適気温の検索に要する期間は一層短縮されるであろう。更には、一作期を通した本法の繰り返し適用によって、栽培終了時には生育段階別の至適環境を解明できると考えられる。この場合、同一個体の使用によって処理に必要な環境制御室などの装置、調査個体数並びに管理、調査に必要な労力が極めて少なくなる。したがって、本法の適用によってデータの収集・蓄積が迅速化され、これまで事例的であった環境条件と作物生長との関係の体系化が、生体重の面からも可能になると考えられる。

第2節 生育段階別温度・光－生長反応の解析

リーフレタスの栽培環境の中で、温度と光は基本的な要因である。前節では、生体重のモニタリング装置を用いて、生体重の増加率でみた温度－生長反応の迅速な解析法の開発を行った。蒸散速度の変化に起因する生体重の一時的変動の影響は、その期間のデータを生体重の増加率の計算から除外するか、飽差を一定に保つことによって補正または消去できたので、生体重の増加率でみた生長の適温を数日間で検索できることが明らかになった。

本節では、この方法をリーフレタスの環境－生長反応の解析に適用して、生育段階別・温度・光－生長データベースのプロトタイプを作成した。

このため、飽差一定の条件下で繰り返し変温してリーフレタスを1作期間栽培した。この間の生体重をモニタリングして生育段階別の生体重増加率を算出し、これを光強度を変えて繰り返した。さらに、生育中期の光・温度－光合成曲線を作って生体重の増加率でみた結果との違いを比較・検討した。

第1項 生体重の増加率でみた生育段階別温度・光－生長反応

実験方法

‘グラントラピッド’の催芽種子をもみがらくん炭には種し、本葉1枚展開時に大塚ハウス肥料A処方の標準の1.5倍濃度の養液に上の定植板に株間15cmで定植した。養液への通気は、小型エア－ポンプで常時行い、pHおよびECはときどき調整した結果、それぞれ5.3～6.3および3.0～3.7 mS cm^{-1} の範囲にあった。地上部の環境条件は、気温 20 ± 0.5 °C、日長18時間、光量子束密度 $388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （波長範囲 400～700nm）、相対湿度70～85%で栽培した。

生体重のモニタリングは3型の装置で行い、生育の前期（生体重約 4～15 g）および中期（約15～50 g）では3個体、後期（約50～120 g）では1個体をそれらの重心が定植板の中央に来るように一辺が15cmの正三角形の頂点または定植板中央に配置した。定植後の環境は、飽差 0.4 kPa、気温20°Cとし、3日後から気温の段階的变化を開始した。処理は、気温を一旦15°Cに下げてから13時間ごとに5°Cずつ上昇させ、35°Cからは再び段階的に低下させ、これを1作期間繰り返した。変温には30分を要した。生体重の増加率は、変温開始1時間後および同13時間後

の相対的増加率（% $12h^{-1}$ ）とし、昇温および降温過程の2回の平均値を求めた。光条件は1作期間同じとし、光量子束密度が236, 307, 412および $516 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ の一定連続照明下で気温を段階的に変温して処理した。

実験結果

生育段階・光強度別の温度－生体重増加率曲線をFig.36に示した。生育前期におけるリーフレタス生体重の増加率は、 $236 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ では $25^{\circ}C$ 、それ以上の光強度では $30^{\circ}C$ の場合に高く、最高値は $412 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 、 $30^{\circ}C$ の条件で $18.4 \% 12h^{-1}$ であった。生育中期における生体重の増加率は、いずれの気温でも $412 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ で高く、 $516 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ では低下した。生体重増加率の最高値は $25 \sim 30^{\circ}C$ で認められ、その値は $21.8 \% 12h^{-1}$ であった。生育後期における生体重増加率は、 $25 \sim 30^{\circ}C$ で最高になったが、気温の影響は小さかった。光量子束密度 $307 \sim 412 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ で生体重の増加率は高くなり、最高は、 $412 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 、 $30^{\circ}C$ の条件下で $13.9 \% 12h^{-1}$ であった。

第2項 光合成速度でみた温度・光－生長反応

実験方法

1987年3月4日に‘グランドラビッド’の種子5粒を12cm黒ポリ鉢に直播した。鉢は、無加温ガラス室内のポリエチレントンネル内に置き、トンネルの開閉は毎日、灌水は土壌の水分状態を確認して適宜行った。子葉展開時と本葉1枚展開時に間引いて、生育のよい1個体を残した。光合成速度の測定の5日前に気温 25

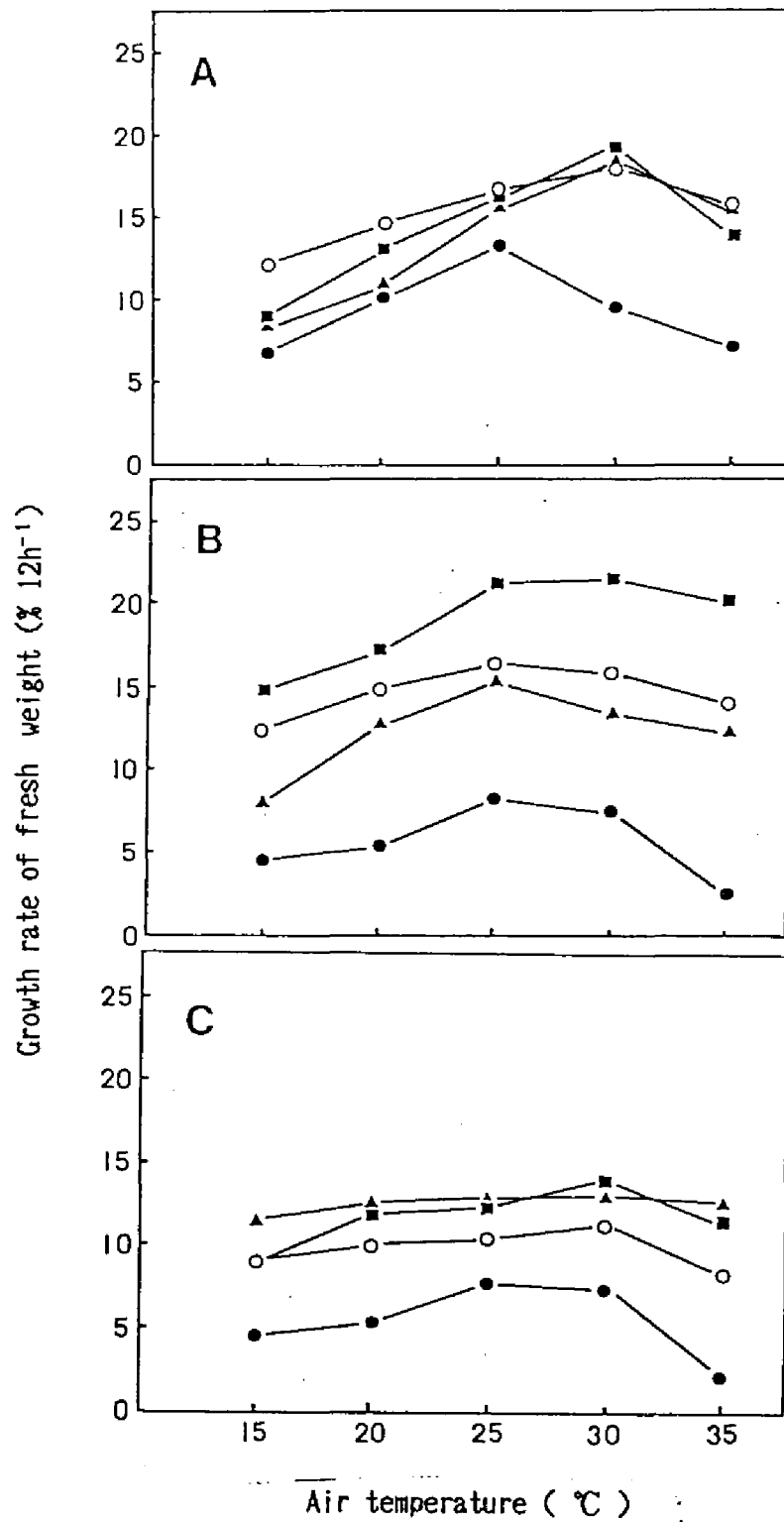


Fig. 36. Effect of air temperature on growth rates of fresh weight in leaf lettuce at photon flux density 236(●), 307(▲), 412(■) and 516(○) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The growth rates at each temperature were measured by stepwisely changing air temperature every 12-hours. Growth stages are showed in fresh weight 4~15g(A), 15~50g(B) and 50~120g(C).

± 1 °C, 相対湿度80±5%, 光量子束密度166 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の連続照明の環境制御室に入れた。実験は5月13日から20日までの間に行い、温度を変えることに供試個体を取り替えた。実験終了時の作物の葉数は13~15枚、地上部生体重は27~45 gであった。光合成量は、第3章第3節第1項の光合成蒸散測定装置で測定した。同化箱の中には一度に3個体を入れ、飽差 1.0 kPaで 5, 15, 20, 25, 30または35°Cに12時間保って前処理し、処理中の飽差は常時 0.4 kPaとした。光強度の処理は、各温度ごとに光量子束密度1726, 1293, 982, 705, 411, 238, 108, 32 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の順で約30分ごとに低下させ、最後に暗黒にした。その後、地上部を切除し、同じ条件で鉢から放出される CO₂ 量を測定した。光合成量は鉢から放出される CO₂ 量を差し引いて求めた。光源には陽光ランプを用い、黒寒冷しゃの枚数を変えて光強度を調節した。

実験結果

水蒸気飽差 0.4 kPaにおける光強度別の温度-光合成曲線をFig.37に示した。光合成速度は、光量子束密度 982 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では30°Cで最大になったが、そのほかでは25°Cであった。暗黒では、高温ほど呼吸が増加した。10°Cでは、光強度を増した割合には光合成速度が増加しなかった。光飽和点は、10°Cでは 1726 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, それ以上の気温では1293 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。

第3項 考 察

生体重の増加率でみたリーフレタスの環境-生長反応データベースのプロトタ

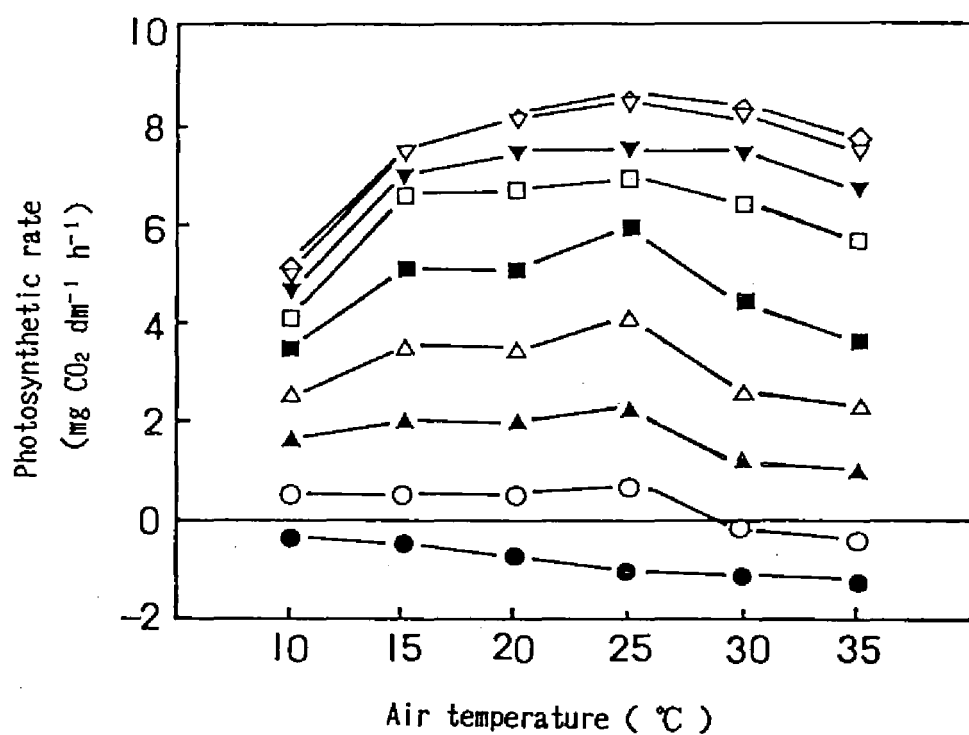


Fig. 37. Effect of air temperature on photosynthetic rate of leaf lettuce at photon flux density 0(●), 32(○), 108(▲), 238(△), 411(■), 705(□), 982(▼), 1293(▽) and 1726(◇) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Water vapor deficit was kept at 0.6 kPa.

イブを作成した。生体重増加率も光合成速度も、およそ25℃で最高または最大になった。すなわち、生体重でみた生長は光合成速度とほぼ比例関係にあって、温度-生長反応の解析に利用できると考えられる。

しかし、光強度を大きくして行くと、光飽和点は、生体重の増加率で約 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、光合成速度での約 1300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と比較して低かった。明期の水ストレスを暗黒によって軽減すると、暗黒下に移してから生体重の増加は明期の光強度に比例し、この場合の光飽和点は約 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上になった（第2章第3節第2項）。したがって、暗期の生体重は明期に蓄えた同化産物の量に応じて増加し、明期では作物の水分状態が変わるために認められなかった真の生長が、暗期の生体重の変化に現れるようになると推察される。また、弱光下で育った植物を強光下に移すと、一般的に作物が萎凋したり、生体重の増加が鈍化する現象からも、光強度の増大に伴う作物体内水分の一時的な減少が、生体重増加率の飽和点を低くしている原因と考えられる。いずれにせよ、光量子束密度 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上では、水ストレス状態になることが明かである。

これらのことから、生体重でみたリーフレタスの生長は気温25℃で優れ、光飽和点は約 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であるが、暗黒下に移して水ストレスを軽減すると光合成速度の光飽和点 1300 $\mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に近づくことが明らかになった。また、この事例から本法が生長反応の解析に利用できることが示された。

第3節 生体重の変化から推定した至適環境の栽培への適用

前節で、温度・光条件と生体重の増加率・光合成速度との関係を整理したところ、至適温度はほぼ一致したが、光飽和点に違いが認められた。すなわち、生体重増加率の光飽和点は、光合成速度のそれのそれと比較して著しく低かった。これは、強光下の植物は蒸散によって体内水分を失い、水ストレス状態になるからと考えられた。

そこで、この結論を水ストレスの軽減による生長の促進によって確かめようとした。このため、自然光下で栽培しているリーフレタスに遮光および加湿処理を行って生育に及ぼす影響を調べた。

第1項 遮光がリーフレタスの生育に及ぼす影響（水耕）

実験方法

1988年1月11日に‘グランドラビッド’の催芽種子をもみがらくん炭には種し、無加温ガラス室内の塩化ビニルトンネル内に置いた。トンネル内の気温は、5～28℃の範囲で管理した。灌水には、大塚ハウス肥料A処方の養液を標準の1/2濃度に薄めて用いた。2月4日に本葉が2枚展開した苗をM式水耕ベッド（葉菜用）に定植した。ベッドの大きさは、90×360×9 cmで、ベッドおよびタンクにそれぞれ260および140 lの養液を満たした。定植後は、A処方の標準濃度養液に切り替え、噴出量15 l min⁻¹のポンプで1時間に15分間養液を循環した。株間お

よび条間は、それぞれ24および16cmで、4条植えとした。2月14日から遮光率50%の黒寒冷遮で被覆した遮光区を設けた。

栽培は、無加温ガラス室内で行った。ガラス室内の対照区における日最高光強度の推移はFig.38の通りであった。光量子束密度は、最高および最低が、それぞれ1320および100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、平均が674 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、ベッドの上方10cmで各区の気温を測定したところ、栽培期間中の最高および最低気温の平均は、無遮光区で24.1および3.1°C、遮光区で24.0および3.3°Cであった。

養液のpHおよびECは、それぞれ5.3~6.4および2.3~2.4 mS cm^{-1} の範囲にあった。

3月17日に各区10個体を生育調査した。葉数は、葉身長1cm以上を目安として数え、根の生体重は付着水を手早く拭き取って測定した。乾燥は、80°Cで3日間行った。

実験結果

遮光が水耕リーフレタスの生長に及ぼす影響をTable 12に示した。葉数、生体重および乾物重に対する遮光の影響は認められなかった。

遮光が水耕リーフレタスの形態に及ぼす影響をTable 13に示した。遮光によって葉の乾物率が低くなり、SLAが大きくなった。また、最大葉の葉長を伸長させて葉長／葉幅を大きくし、葉色を淡くした。しかし、茎長および茎径には影響が認められなかった。

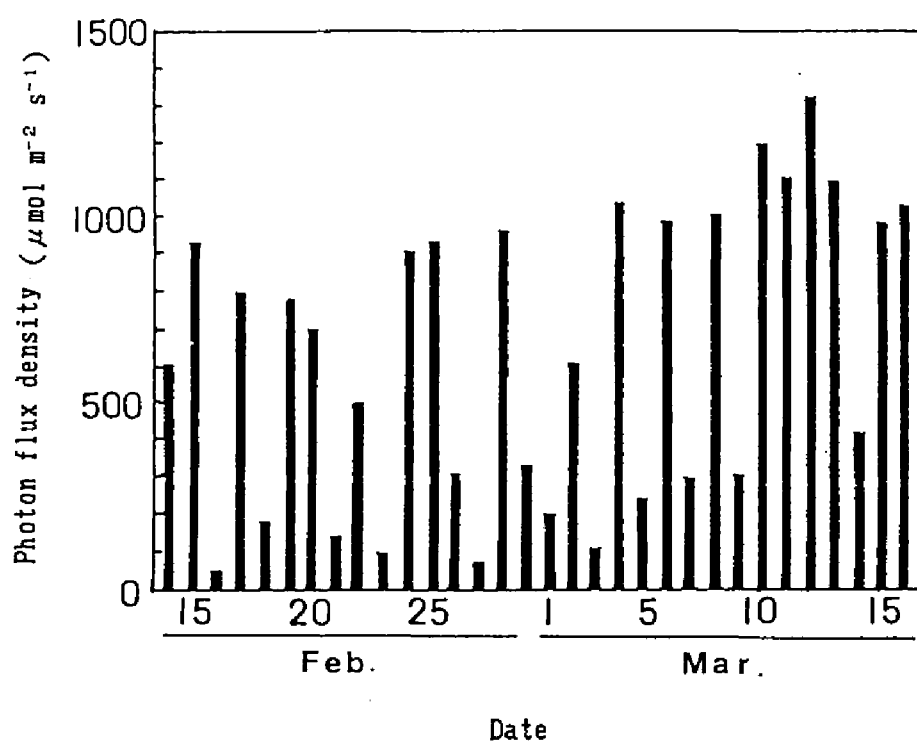


Fig. 38. Change in maximum photon flux density in a glass house (at Ano in 1988).

Table 12. Effect of shading on the growth of leaf lettuce in solution culture.

Treatment	Number of leaves	Fresh weight (g)			Dry weight (mg)		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Control	20.0	65.8	3.1	16.6	4250	277	992
Shading	20.7	66.9	2.7	16.3	4150	258	775
t-Test	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS: Non-significant difference at 5% level.

Table 13. Effect of shading on the configuration of leaf lettuce in solution culture.

Treatment	All leaves		Maximum leaf			Values of green meter	Stem	
	DMR(%)	SLA(cm ⁻¹ g)	L(cm)	W(cm)	L/W		L(cm)	D(cm)
Control	8.2	320	16.6	15.4	1.09	34.8	3.03	1.48
Shading	6.3	515	20.6	16.8	1.24	30.7	2.53	1.50
t-Test	***	**	**	NS	*	*	NS	NS

DMR: Dry matter rate; SLA: Specific leaf area; L: Length; W: Width; D: Diameter.

NS: Non-significant difference at 5% level.

*, **, ***: significant difference at 5%(*), 1%(**) and 0.1%(***) level.

第2項 加湿がリーフレタスの生育に及ぼす影響（水耕）

実験方法

1988年2月5日に‘グランドラビッド’の催芽種子をもみがらくん炭には種し、第1項と同じ条件で育苗した。2月22日に本葉が2枚展開した苗15個体を大塚ハウス肥料A処方の標準濃度養液を用いたM式水耕装置に株間15cmで定植した。これを2反復した。養液は、40×80cm、深さ20cmの養液槽に60 l満たし、小型エアーポンプで送った空気をエアーストーンに通して常時通気した。2月24日からは、午前9時から午後3時までの間に限って相対湿度90%を目途に加湿した加湿区を設けた。加湿は、湿度調節器（ニッポー電機製 HCP型）と超音波加湿器（ニッポー電機製 N430-105型）を組合わせて制御した。加湿しなかった区を対照区とし、両区にはそれぞれ別の小型ガラス室（10m²）を充てた。この結果、栽培期間中の午後1時の相対湿度は、Fig.39のように推移した。対照区および加湿区の相対湿度は、それぞれ平均で55および73%であった。

栽培期間中の天気は、晴天、曇天および雨天がそれぞれ17、10および8日であった。栽培期間中のガラス室内における日最高光強度の最高および最低は、それぞれ40および1387 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、平均で 689 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。気温は、加湿および換気を行った結果、対照区が5.8～29.5℃、加湿区が6.5～29.2℃であった。

養液のECは、対照区が2.3～2.4 mS cm^{-1} 、加湿区が2.2～2.4 mS cm^{-1} 、pHは対照区で3.3～6.4、加湿区で3.2～6.4の範囲にあった。

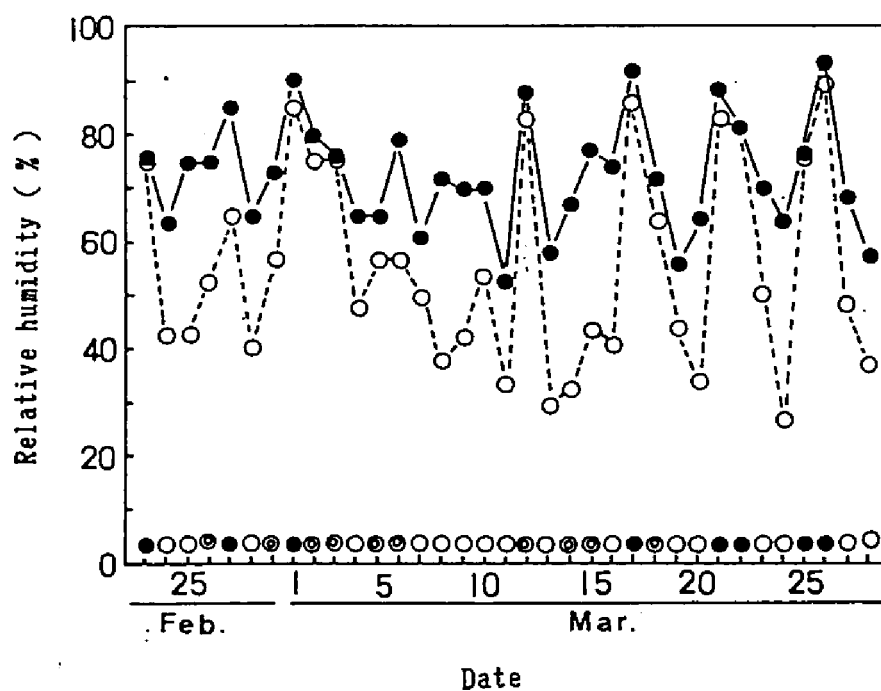


Fig. 39. Changes in relative humidity at 1:00PM in a glass houses which was vaporized(●) and not(○). Weather is shown as ○(fine), ⊙(cloudy) and ●(rainy).

生育調査は、3月28日に行った。葉数は、葉身長が1cm以上を目安として数え、根の生体重は付着水を手早く拭き取って測定した。乾物重は80℃で3日間乾燥して測定した。

実験結果

加湿が水耕リーフレタスの生長に及ぼす影響をTable 14に示した。葉数および茎の生体重には、加湿の影響は認められなかったが、葉面積、葉と根の生体重、乾物重（葉、茎および根）は加湿によって大きくなった。

加湿が水耕リーフレタスの形態に及ぼす影響をTable 15に示した。加湿がSLA、葉長および葉色に及ぼす影響は、認められなかった。しかし、加湿によって乾物率、最大葉の葉長／葉幅は小さく、最大葉の葉幅、茎の長さとは大きくなった。

第3項 加湿および遮光がリーフレタスの生育に及ぼす影響（鉢栽培）

実験方法

第2項の苗を2月22日に5号素焼鉢に鉢上げし、無加湿ガラス室内で育てた。その鉢を3月8日に第2項の設定条件の小型ガラス室内へ移した。無加湿の対照区に対して加湿区を設け、更に遮光を加えた加湿＋遮光区の3区を設定した。各区とも12個体を供試した。遮光は、光線透過率50%の黒寒冷しゃを用いた。灌水は小型ガラス室内に貯めた水で適宜行った。

遮光を開始してからの天気は、晴天、曇天および雨天が12、4および5日であ

Table 14. Effect of Vaporization on the growth of leaf lettuce in solution culture.

Treatment No. of	leaf	Fresh weight (g)				Dry weight (mg)		
		leaves area(cm ²)	Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
Cont.	14.0	648	28.8	1.2	5.8	2210	123	402
Vapor.	15.5	1078	56.9	2.6	11.4	3430	183	606
t-Test	NS	***	***	***	***	***	NS	***

NS: Non-significant difference at 5% level.

*, **, ***: significant difference at 5%(*), 1%(**) and 0.1%(***) level.

Table 15. Effect of vaporization on the configuration of leaf lettuce in solution culture.

Treat.	All leaves		Maximum leaf			Values of green meter	Stem	
	DMR(%)	SLA(cm ⁻¹ g)	L(cm)	W(cm)	L/W		L(cm)	D(cm)
Cont.	7.7	294	13.7	13.0	1.06	33.7	2.5	1.15
Vapor.	6.0	317	14.6	17.8	0.83	34.2	3.0	1.45
t-TEST	***	NS	NS	***	**	NS	*	***

DMR: Dry matter rate; SLA: Specific leaf area; L: Length; W: Width;
D: Diameter.

NS: Non-significant difference at 5% level.

*, **, ***: significant difference at 5%(*), 1%(**) and 0.1%(***) level.

った。この間の日最高光量子束密度の最高および最低は、それぞれ40および1387 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，平均で 816 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。気温は、対照区が5.8～29.5℃，加湿および加湿＋遮光区が6.5～29.2℃であった。

3月29日に地上部を切り取って生育調査した。

実験結果

加湿および遮光が土壌で栽培したリーフレタスの生長に及ぼす影響をTable 16に示した。葉数、葉の生体重、葉および茎の乾物重は加湿によって大きくなったが、さらに遮光すると対照区との差が無くなった。茎の生体重は、遮光によって小さくなったが、対照区よりも大きかった。しかし、葉面積は遮光しても小さくなることはなかった。

加湿および遮光が土壌で栽培したリーフレタスの形態に及ぼす影響をTable 17に示した。茎長に対する加湿および遮光の影響は認められなかった。最大葉長および茎径は、加湿によって大きくなったが、さらに加えた遮光の影響は認められなかった。乾物率は、加湿によって小さくなったが、さらに加えた遮光の影響は認められなかった。SLAは、加湿によって大きくなり、遮光処理を加えると更に大きくなった。最大葉の葉長／葉幅に対しては、加湿の影響は認められなかったが、遮光によって大きくなった。また、葉色は、加湿と更に遮光によって一層淡くなった。

第4項 考 察

Table 16. Effect of vaporization and shading on the growth of leaf lettuce cultured in potted soil.

Treatment	Number of leaf leaves	leaf area(cm ⁻²)	Fresh weight		Dry weight	
			Leaf(g)	Stem(g)	Leaf(g)	Stem(mg)
Cont.	10.5 ^a	325 ^a	12.7 ^a	0.33 ^a	1.24 ^a	49 ^a
Vapor.	12.5 ^b	564 ^b	23.5 ^b	0.75 ^b	1.61 ^b	69 ^b
Vapor.+Shad.	11.0 ^a	461 ^b	16.6 ^a	0.53 ^a	1.11 ^a	43 ^a

Values followed by different letters are significantly different at 5% level.

Table 17. Effect of vaporization and shading on the configuration of leaf lettuce cultured in potted soil.

Treatment	All leaves		Maximum leaf			Values of green meter	Stem	
	DMR(%)	SLA(cm ⁻¹ g)	L(cm)	W(cm)	L/W		L(cm)	D(cm)
Cont.	9.2 ^a	264 ^a	12.2 ^a	11.5 ^a	1.08 ^a	29.2 ^a	1.92 ^a	0.67 ^a
Humid.	6.8 ^b	351 ^b	14.2 ^b	13.4 ^b	1.06 ^a	26.7 ^{a,b}	1.82 ^a	1.02 ^b
Humid.+Sad.	6.7 ^b	417 ^c	15.1 ^b	11.9 ^a	1.29 ^b	25.5 ^b	1.83 ^a	0.88 ^b

DMR: Dry matter rate; SLA: Specific leaf area; L: Length; W: Width;

D: Diameter.

Values followed by different letters are significantly different at 5% level.

水耕リーフレタスを遮光すると、葉数、生体重および乾物重に対する影響は、ほとんど認められなかったが、形態的な変化は顕著であった。すなわち、葉が縦方向に伸びて、葉が薄く大きくなり、乾物率が低下して、葉色が淡くなった。栽培中のガラス室内の日最高光強度は、平均で $674 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、50%遮光下では日中の大部分が $337 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下であったと考えられる。本章第2節第1項では生体重の増加率の光飽和点が約 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であったが、本実験では、結果的に強すぎる遮光をしたことになった。したがって、遮光による生長の促進効果は認められなかった。しかし、形態的な影響は顕著であり、水分を増し、葉を縦長に大きくして、色を淡くする目的には有効な方法と考えられる。

これに対し、加湿は葉面積、生体重および乾物重も大きくし、形態的にも顕著な影響を示した。加湿によって乾物率が低下したが、葉幅の増大による葉長／葉幅の減少と茎長、茎径の増大は、生育段階が進んだ結果と考えられる。高湿度による作物の生長促進は、サラダナ (Tibbitts・Bottenberg, 1976)、キュウリ (橋本ら, 1981)、12種の花き (Mortensen, 1986)、イネ (平井ら, 1983)、などで広く認められている。この事実を、トマト・キュウリ (長岡ら, 1984)、ストロベリー (Raschke・Resemann, 1986)、ヒマワリ (Bunce, 1984)、イネ (平井ら 1984、石原・黒田 1986) などの光合成速度が、高い空気湿度によって促進されることによっても確かめられている。これらを勘案すると、加湿は、遮光と比較して葉の厚さや長さに影響することが少なく、生長を促進する効果が大きいと考えられる。

土壌で栽培したリーフレタスに加湿と遮光処理を行った結果でも、加湿の生長促進効果が最も大きく、加湿に遮光を加えるとその効果が小さいか、返って生育が劣った。光エネルギーは光合成を経て、生長の基質となる。また、光合成速度の飽和点が約 $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であったことを勘案すると、光は強い方が生長に有利と思われる。したがって、日中の水ストレスを軽減して、リーフレタスの生長を促進するためには、遮光よりも加湿の方がより有効と考えられる。

植物を、強光、連続照明および高炭酸ガス濃度条件下で育成すると、光合成速度は大きくなるが、硬いばかりでみずみずしい光沢に欠ける植物になり、しだいに下葉が黄化することはよく知られている。野菜では、適度な硬さ、みずみずしい光沢など植物の体内水分に起因する品質が収穫物の特性として重要であり、光合成速度や乾物生産だけでは栽培の至適環境を決定できない。野菜の品質の評価は、個人差があって一律に論じることが難しいが、本実験からは、遮光によってこのような形質をある程度付与することができ、加湿によってリーフレタスの生長を促進できることが明らかになった。

第4節 総合考察

野菜は、大部分を水が占めているので、乾物生産だけで収量や品質を決定することはできない。そこで、生体重の増加でみた至適環境の解析を検討した。

はじめに、段階的な変温条件下でモニタリングした生体重の増加率の正確な測

定法を明らかにしようとした。その結果、相対湿度が一定の場合、温度が上昇すると飽差が大きくなって蒸散速度が増し、生体重が一時的に減少するのに対して、降温時には、この関係が逆になった。その変動は、変温中とその後約30分の間で大きかったので、変温開始後1時間のデータを除外して生体重の増加率を求めた。これによって、変温に伴う生体重の一時的な変動の影響をかなりの程度補正できた。さらに、測定精度の一層の向上と生体重増加率の算出に必要なモニタリングの時間短縮には、飽差を一定に保つのが一層有効であることが明らかになった。本実験とは別に、6および9時間の生体重をモニタリングした結果では、生体重増加率は不安定で、必ずしも正確ではなかった。しかし、12時間では安定し、ほぼ満足できる精度が得られた。この場合、例えば6段階の温度処理を3日間で行えるので、至適温度の検索が迅速化されると判断された。

この方法では、生体重のモニタリング装置とコンピュータ制御の環境調節装置がそれぞれ1台あって、収穫まで変温を連続して繰り返せば、生育段階別の至適気温がほとんど自動的に検索される。そこで、光条件も加えて、生育段階別の温度・光－生体重増加率曲線を作成した。これを温度・光－光合成曲線と比較・検討したところ、両曲線から得られた至適温度は25～30℃で一致したが、光飽和点は異なった。すなわち、生体重増加率の光飽和点の約 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ は、光合成速度のその約 $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ よりもかなり低かった。しかし、第2章第3節第2項で明らかにしたように、後で暗黒を与えると、生体重増加率でみた光飽和点は光合成速度でみたそれに近づいた。すなわち、明期の生体重増加率は、

強光ほど作物が水ストレス状態になるため、光飽和点が低くみえることが明かである。光強度、飽差、風速など蒸散速度が変化して作物の水分状態が異なる条件下では、生体重計測の誤差は大きくなる。このような場合、作物の水分状態を一定にするために光、温湿度、風速が一定の条件に戻してから生体重を計測する必要がある。

以上の結果は、強光下の作物が水ストレスによって生育遅延している可能性を示唆するものでもある。この推論を実証するために、自然光下で栽培しているリーフレタスに遮光および加湿処理をして、水ストレスの軽減が生育に及ぼす影響を調べた。この結果、遮光は、生体重や乾物重への影響は認められなかったが、食用部分である葉は、水分が多く、伸長して薄く大きくなり、色が淡くなった。これに対し、加湿は、作物の水分を増したが、葉の色や厚さに対する影響は少なく、葉長／葉幅はむしろ低下した。観察からも、みずみずしさの保持と生長の促進効果が明かであった。さらに、加湿と遮光を併用すると、高湿度条件では、遮光によって返って生育の劣る傾向が認められた。これらのことから、光強度の小さい冬季のリーフレタス栽培では、加湿の生育促進効果が大きい、高湿度条件での遮光は水ストレスの軽減の面からはほとんど効果のないことが明らかになった。

ただし、本実験では認められなかったチップバーンが、明期の高湿度によって発生するとの報告 (Collier・Tibbit, 1984) もあるので、さらに生理的な面からの検討も必要と思われる。

第5節 摘 要

生体重のモニタリングによってリーフレタスの至適環境を迅速に推定しようとした。その方法は、段階的な変温下で生体重の増加率を求めるものである。

変温中の生体重は変動し易いので、まず、この補正法を検討した。その結果、相対湿度一定条件では変温中とその後30分の生体重の変化を無視することにより、それでなければ飽差を一定に保つことによって3日間で温度－生体重増加率曲線を描けることが明らかになった。

次に、この方法を使って生育段階別の温度・光－生体重増加率曲線を作成し、温度・光－光合成曲線と比較した。生体重の増加率で見た生長の至適温度と光合成速度のそれは、ともに25～30℃であったが、光飽和点は光合成速度の約 $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に対し、生体重増加率のそれが $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と異なった。このことから、強すぎる日射は作物に水ストレスを生じ、リーフレタスの生長を抑制している可能性が示された。

これを実証するためにガラス温室で遮光と加湿の効果を検討した。その結果、光強度の小さい冬季のリーフレタス栽培では、加湿の生育促進効果が大きいが、高湿度条件での遮光は水ストレスの軽減の面からはほとんど効果のないことが明らかになった。

第5章 総 括

施設園芸の重装備化に伴って装備の高度利用による生産性の向上が望まれるようになった。このための精密な栽培ソフトウェアを開発しようとする、野菜の生長速度を迅速に判断できる指標が不足していることに気づいた。すなわち、野菜では収穫物の90%以上を水が占めているにもかかわらず、物質生産に偏して生長反応が研究されている。

そこで、近年のセンサの発達に伴って注目を集めている各種の生体情報の中から、野菜に適した計測対象として生体重を選び、そのモニタリング技術の開発、それによる野菜の生長反応の解析と栽培への応用を試みた。その対象作物としては、重装備化された施設園芸の最先端に位置する野菜工場に導入されているにもかかわらず、実験データの少ないリーフレタスを選んだ。

第1章では、作物を水耕しつつロードセルで生体重をモニタリングする装置を開発しようとした。このため、供試材料であるリーフレタスの至適養液条件を検討し、大塚ハウス肥料のA処方では、濃度が標準の1.5~2.0倍、pHが6前後、養液温度が25℃前後で生育が優れることを明らかにした。溶存酸素濃度は7.3ppm以上に維持する必要性が認められたが、高温ほど呼吸が増加したことから、基本的にはできるだけ微細な気泡で十分な通気を行うのが安全と考えられた。次に、このような養液条件を維持しつつ生体重の正確なモニタリングを行うための装置の試作、改良並びに特性評価を行った。その結果、定植板を数個のロードセルで下か

ら受ける支持方式を採用し、ロードセルへの印加電圧源に安定化電源を用い、養液の水位を一定に保つことが計測誤差を小さくする上で重要であることが明らかになった。一方、温度変化や長期使用の影響は少ないので、作物生長のモニタリング装置として利用できると考えられた。

第2章では、この装置に実際に作物を定植して、作物の生長を正しくモニタリングできるか否か検証しようとした。まず、定植してから活着するまでの間の生長速度はそれ以降と異なると考えられたので、生体重のモニタリング装置を使って活着の時期を推定した。同時に解体調査した根の形態と生理活性の変化からは、生体重が減少から増加に転じる頃に活着することが明らかになった。活着に要する日数は、養液温度が10から30℃の範囲で2日以内であった。この結果に基づき、定植後の生体重が増加し始めるのを確認してから収穫までの長期計測を始めた。生体重の変化をその増加率に変換し、同時に行った解体調査の結果と比較したところ、生体重増加率の変化はその時々の子育の状態を反映していた。したがって、本装置によって作物生体重の長期的なモニタリングが行えると判断された。また、解体調査の結果として生体重と他の形質との関係が明らかになり、生体重のモニタリングによる生育段階の推定がある程度可能になった。12時間までの暗期における生体重の増加は、それ以前の光強度に依存した。また、生体重の増加速度が低下し始めた暗黒後12時間目は、呼吸が低下し始めた時期に一致した。呼吸は、同化産物を基質として生長活動を行った結果排出されるので、生体重の増加速度も暗期における徒長の開始時期の推定に有効と考えられた。

第3章では、環境の変化に伴う作物生体重の短期的変化を明らかにして、生体重増加率のモニタリングにおいて精度を向上させるための留意事項を明らかにしようとした。その結果、暗期から明期、高湿度から低湿度、風速の 0 m s^{-1} から 0.5 m s^{-1} への変化によって、いずれも30分以内に生体重が減少した。暗期から明期への変化では、蒸散速度と水分欠差が増大した。また、気温を上昇させると、相対湿度一定では生体重が減少したのに対し、飽差一定ではほとんど変化しなかった。これらの結果から帰納して、生体重は蒸散が盛んになるような環境の変化によって減少することが明らかである。この場合の作物は水ストレス状態にあることから、生体重の一時的な増減は、作物の水分状態の指標になると考えられた。逆に、生体重の変化の中から不可逆的な真の生長を摘出するためには、蒸散速度が同じになるような環境条件下で生体重をモニタリングする必要があると結論された。

第4章では、生体重のモニタリングによってリーフレタスの至適環境を迅速に推定しようとした。その方法は、段階的な変温下で生体重の増加率を求めるものである。第3章でも指摘したように変温中の生体重は変動し易いので、まずこの補正法を検討した。その結果、相対湿度一定条件では変温中とその後30分の生体重の変化を無視することにより、それでなければ飽差を一定に保つことによって3日間程度の迅速さで温度-生体重増加率曲線を描けることが明らかになった。次に、この方法を使って生育段階別の温度・光-生体重増加率曲線を作成し、温度・光-光合成曲線と比較した。生体重の増加率で見た生長の至適温度と光合成

速度のそれは、ともに25～30℃であったが、光飽和点は光合成速度の約1300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に対し、生体重増加率のそれは400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と異なった。しかし、第2章第3節第2項で明らかにしたように、後で暗黒を与えると、生体重増加率でみた光飽和点は光合成速度でみたそれに近づいた。すなわち、明期の生体重増加率は、強光ほど作物が水ストレス状態になるため、光飽和点が低くみえることが明かである。光強度、飽差、風速など蒸散速度が変化して作物の水分状態が異なる条件下では、生体重計測の誤差は大きくなる。このような場合、作物の水分状態を一定にするために光、温湿度、風速を一定の条件に戻してから生体重を計測する必要がある。

これらの結果は、また、強すぎる日射は作物に水ストレスを生じ、リーフレタスの生長を抑制している可能性も示唆している。これを実証するために、ガラス温室で遮光と加湿の効果を検討した。その結果、光強度の小さい冬季のリーフレタス栽培では、加湿の生育促進効果が大きいが、高湿度条件での遮光は水ストレスの軽減の面からはほとんど効果のないことが明らかになった。

以上のように、生体重のモニタリング手法が確立され、リーフレタスの生体重の増加からみた環境－生長反応データベースのプロトタイプを作成することができた。このデータベースの活用によって遮光や加湿などの水ストレスを軽減する栽培法の有効性が推察・実証された。これらのことから、収穫物の大部分を水分が占める野菜では、生体重の観点から生長を捉え直す意義が明らかになった。ここで使用した生体重のモニタリング手法は、自然環境下の生長解析や環境調節装

置を用いた至適環境の検索などの有効な研究手段になり、そのまま栽培管理のモニターとしての応用にも役立つものと考えられる。

今後、各種の生体情報のモニタリング手法が確立されれば、それらの組合せによって発育・生長が一層正しく捉えられるようになると考えられる。暫くは、試行錯誤が続くと思われるが、生体情報のモニタリングはこれからの農業研究と新技術開発に新しい一面を切り開くものと期待される。

引用文献

- 1) AHLRICHS, J.S. and M.E. BAUER. (1983): Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. *Agron. Jour.*, 75, 987-993.
- 2) AOKI, M., K. YABUKI, T. TOTSUKA and M. NISHIDA (1986): Remote sensing of chlorophyll content of leaf (I) Effective spectral reflection characteristics of leaf for evaluation of chlorophyll content in leaves of dicotyledons. *Environ. Control in Biol.*, 24, 21-26.
- 3) 青木正敏・王茂新・矢吹万寿・戸塚 績 (1986) : 葉のクロロフィル量の遠隔測定法に関する研究 (II) 植物群落のクロロフィル量および葉面積指数の推定に有効な分光反射特性. *生物環境調節*, 24, 33-39.
- 4) 新井和夫・古谷茂貴・浅沼 智 (1985a) : 空気湿度がトマトの光合成に及ぼす影響. *野菜試栽培部研究年報*, 12, 10-12.
- 5) 新井和夫・古谷茂貴・浅沼 智 (1985b) : 空気湿度がキュウリの光合成に及ぼす影響. *野菜試栽培部研究年報*, 12, 12-14.
- 6) 荒木陽一 (1985) : 施設栽培における新実用化技術 [14] 体内水分を指標とした水管理 (1). *農及園*, 60, 1187-1191.
- 7) ASTON, M.J. and D.W. LAWLOR (1979): The relationship between transpiration, root water uptake, and leaf water potential. *J. Exp. Bot.*, 30, 169-181.
- 8) BUNCE J.A. (1984): Effects of Humidity on photosynthesis. *J. Exp. Bot.*, 35, 1245-1251.
- 9) BUNCE, J.A. (1987): In-phase cycling of photosynthesis and conductance at saturating carbon dioxide pressure induced by increases in water vapor pressure deficit. *J. Exp. Bot.*, 38, 1413-1420.
- 10) CATHY, H.M., L.E. CAMPBELL and R.W. THIMIJAN (1978): Comparative development of 11 plants grown under various fluorescent lamps and different durations of irradiation with and without additional incandescent lighting. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 103, 781-791.

- 11) CHRIST, R.A. (1978a): The elongation rate of wheat leaves I .
Elongation rates during day and night. J.Exp.Bot., 29, 603-610.
- 12) CHRIST, R.A. (1978b): The elongation rate of wheat leaves II. Effect
of sudden light change on the elongation rate. J.Exp.Bot., 29, 611-618.
- 13) COLLIER, G.F. and T.W. TIBBITS (1984): Effects of relative humidity
and root temperature on calcium concentration and tipburn
development in lettuce. J.Amer.Soc.Hort.Sci., 109, 128-131.
- 14) CUTLER, J.M., K.W. SHAHAN, and L. STEPONKUS (1980): Influence of water
deficits and osmotic adjustment on leaf elongation in rice. Crop
Sci., 20, 314-318.
- 15) CUTLER, J.M., P.L. STEPONKUS, M.J. WACH, and K.W. SHAHAN (1980):
Dynamic aspects and enhancement of leaf elongation in rice. Plant
Physiol., 66, 147-152.
- 16) EGUCHI, H., and T. MATSUI (1977): Computer control of plant growth by
image processing II. Pattern recognition of growth in on-line
system. Environ.Control in Biol., 15, 37-45.
- 17) EGUCHI, H., and T. MATSUI (1978): Computer control of plant growth by
image processing III. Image processing for evaluation of plant growth
in practical cultivation. Environ.Control in Biol., 16, 47-55.
- 18) EGUCHI, H., M. HAMAKOGA and T. MATSUI (1979): Computer control of plant
growth by image processing IV. Digital image processing of
reflectance in different wave length regions of light for
evaluating vigor of plants. Environ.Control in Biol., 17, 67-77.
- 19) GALLAGHER, J.N., P.V. BISCOE, and R.A. SAFFELL (1976): A sensitive
auxanometer for field use. J.Exp.Bot., 27, 704-716.
- 20) GALLAGHER, J.N. and P.V. BISCOE (1979): Field studies of cereal leaf
growth III. Barley leaf extension in relation to temperature,
irradiance, and water potential. J.Exp.Bot., 27, 645-655.
- 21) GALLAGHER, J.N., P.V. BISCOE, and J.S. WALLACE (1979): Field studies

- of cereal leaf growth IV. Winter wheat leaf extension in relation to temperature and leaf water status. J. Exp. Bot., 30, 657-668.
- 22) GREEN, P.B., R.O. ERIKSON, and J. BUGGY (1971): Metabolic and physical control of cell elongation rate. Plant Physiol., 47, 423-430.
- 23) HAMMER, P.A., T.W. TIBBITTS, R.W. LANGHANS, and J.C. McFARLANE (1978): Base-line growth studies of 'Grand Rapids' lettuce in controlled environments. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 103, 649-655.
- 24) 羽生広道・関山哲雄・岩尾憲三・高木信義 (1984): 植物生体情報の工学的計測と処理 第3報 茎径変化と蒸散流量および吸水量との関係. 電中研報 483010, 1-34.
- 25) 羽生広道・関山哲雄・岩尾憲三・高木信義 (1985): 植物生体情報の工学的計測と処理 第4報 茎径変化による生体機能の評価ならびに実地適用に関する検討. 電中研報, 484024, 1-22.
- 26) 羽生広道・関山哲雄・岩尾憲三・高木信義 (1987): 作物生育環境の茎径日変化に及ぼす影響の評価. 電中研報 486007, 1-21.
- 27) 橋本 康・森本哲夫・船田 周・杉 二郎 (1978): 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (V) 生体内水分のダイナミクスと湿度制御の関係. 生物環境調節, 16, 17-25.
- 28) 橋本 康・五百木啓三・船田 周・丹羽 登・杉 二郎 (1979a): 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (VI) 葉温の画像処理. 生物環境調節, 17, 27-33.
- 29) 橋本 康・一条文二郎・野中金造・大政憲次・船田 周 (1974): 植物体内水分の電子的計測. 生物環境調節, 12, 69-74.
- 30) 橋本 康・森本哲夫・船田 周・杉 二郎 (1979b): 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (VII) 葉温のダイナミクスと湿度制御の関係. 生物環境調節, 17, 47-53.
- 31) 橋本 康・森本哲夫・船田 周・杉 二郎 (1981): 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (XI) 葉温をモニターとする植物生育の最適制御. 生物環境調節, 19, 103-111.
- 32) 橋本 康・丹生谷太・易 佑林・仁科弘重・安西良矩・山崎広義・中山繁樹

- ・池田 彰 (1987) : パルス光照射光源によるサラダナの光合成特性. 生物環境調節, 25, 127-129.
- 33) HEATHCOTE, D.G., J.R. ETHERINGTON, and F.I. WOODWARD (1979): An instrument for non-destructive measurement of the pressure potential (turgor) of leaf cells. *J. Exp. Bot.*, 30, 811-816.
- 34) 平井源一・高橋 誠・嶋村直樹・上野英司 (1983) : 大気湿度が水稻幼苗の生育ならびに生理に及ぼす影響 第2報 大気湿度が水稻幼苗の乾物生産に及ぼす影響. 日作紀, 52, 259-265.
- 35) 平井源一・高橋 誠・田中 修・嶋村直樹・中山 登 (1984) : 大気湿度が水稻幼苗の生育ならびに生理に及ぼす影響 第3報 大気湿度が水稻の光合成速度に及ぼす影響. 日作紀, 53, 261-267.
- 36) 平沢 正・石原 邦 (1978) : 水稻体内水分と環境条件との関係 第1報 葉身の水ポテンシャル・葉面積当り含水量・水欠差について. 日作紀, 47, 655-663.
- 37) HOLE, C.C. and P.A. SCOTT (1984): Pea fruit extension rate I. Effect of light, dark and temperature in controlled environment. *J. Exp. Bot.* 35, 790-802.
- 38) HOLE C.C. and P.A. SCOTT (1984): Pea fruit extension rate II. Effect of Temperature on the relationship with respiration. *J. Exp. Bot.*, 35, 803-812.
- 39) 星野和生・吉川雅夫・野口正樹・池田純男 (1977) : 野菜の収量成立要因の解析に関する研究 I 生長解析法によるレタスの多収条件の検索. 野菜試報 A.3, 1-29.
- 40) HUCK M.G. and B. KLEPPER (1977): Water relations of cotton II. Continuous estimates of plant water potential from stem diameter measurements. *Agron. Jour.*, 69, 593-597.
- 41) HUGO H.R. and P.A. BOTTOMLEY (1987): In situ nuclear magnetic resonance imaging of roots: Influence of soil type, ferromagnetic particle content, and soil water. *Agron. J.*, 79, 957-965.
- 42) 池田 彰・江崎謙治・中山繁樹 (1984) : 全方向照射における植物生育特性

1. サラダナ生長速度に及ぼす光強度, 炭酸ガス濃度および気温の影響. 生物環境調節, 22, 71-77.
- 43) 池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹 (1987): 全方向照射における植物生育特性 II. 蛍光ランプによる近接光照射下でのサラダナ生産に要する照明電力消費量. 生物環境調節, 25, 1-5.
- 44) 池田 彰・河相好孝・江崎謙治・谷口靖子・中山繁樹 (1987): 光合成および生体重量同時計測システム. 生環調25回大会講演要旨, 24-25
- 45) 池田 彰・中山繁樹・山崎広義・安西良矩 (1985): パルス光照射光源とその植物栽培への適用. 計測自動制御学会論文集, 21, 765-767.
- 46) 稲田勝美 (1984): 光と植物生育. 養賢堂. 東京.
- 47) 井上吉雄 (1986): 作物群落の生産機能および状態の非破壊非接触診断に関する研究 第1報 自然条件下における作物キャノピーの熱画像解析. 日作紀, 55, 261-268.
- 48) 井上吉雄 (1987a): 作物群落の生産機能および状態の非破壊非接触診断に関する研究 第2報 赤外線放射センサによるトウモロコシキャノピー温度の特性および気象要因との関係. 日作紀, 56, 30-37.
- 49) 井上吉雄 (1987b): 作物群落の生産機能および状態の非破壊非接触診断に関する研究 第3報 群落放射温度と微気象データの多次元センシングによるトウモロコシ蒸散速度の遠隔推定. 日作紀, 56, 337-344.
- 50) 石原 邦・黒田栄喜 (1986): 水稻葉身の光合成速度に対する空気湿度の影響. 日作紀, 55, 458-464.
- 51) 石原 邦・斉藤邦行 (1987): 湛水状態の水田に生育する水稻の個葉光合成速度の日変化に影響する要因について. 日作紀 56: 8-17.
- 52) ISHIKAWA, H., H. AIZAWA, H. KISHIRA, T. OGAWA, and M. SAKATA (1983):
Light-induced changes of membrane potential in guard cells of
Vicia faba. Plant and Cell Physiol., 24, 769-772.
- 53) 板木利隆・佐々木皓二・宇田川雄二 (1984): 養液栽培の実際, P112-113,
農業電化協会. 東京.
- 54) 伊東 正 (1984): 野菜の工場的生産の実用化に関する研究. (第1報) 実用化し始めた生産施設の概要とその問題点. 昭59秋園学要旨, 260-261.

- 55) 伊東 正 (1985a) : 野菜の工場的生産の実用化に関する究. (第2報) 間欠照明法を導入した施設の栽培環境とその問題点. 昭60春園学要旨, 236-237.
- 56) 伊東 正 (1985b) : 野菜の工場的生産の実用化に関する研究. (第3報) サラダナの生育に対する好適光源ランプの検討. 昭60秋園学要旨, 290-291.
- 57) 鴨田福也・内藤文男 (1975) : 野菜の光合成及び蒸散に関する研究 II 差動トランス利用による生長記録装置及びこれを用いてのトマト, キュウリなどの伸長肥大の測定. 野菜試報 A., 2, 33-47.
- 58) 北野雅治・江口弘美 (1986) : 熱流制御法による茎内水流量のオンライン計測. 生物環境調節, 24, 109-115.
- 59) KLEPPER, B., V.D.BROWNING, and H.M.TAYLOR (1971): Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiol.*, 48, 683-685.
- 60) KOONTZ, H.V., and R.P.PRINCE (1986): Effect of 16 and 24 hours daily radiation(light) on lettuce growth. *Hortscience*, 21, 123-124.
- 61) KOONTZ, H.V., R.P.PRINCE, and R.F.KOONTZ (1987): Comparison of fluorescent and highpressure sodium lamps on growth of leaf lettuce. *HortScience*, 22, 424-425.
- 62) KRIZEK, D.T. and D.P.ORMROD (1980): Growth response of 'Grand Rapids' lettuce and 'First Lady' marigold to increased far-red and infrared radiation under controlled environments. *J.Amer.Soc.Hort.Sci.*, 105, 936-939.
- 63) LORENTZ, H.P. and H.J.WIEBE (1980): Effect of temperature on photosynthesis of lettuce adapted to different light and temperature conditions. *Scientia.Hort.*, 13, 115-123.
- 64) MATSUI, T., and H.EGUCHI (1971): Effect of environmental factors on leaf temperature in a temperature controlled room. *Environ. Control in Biol.*, 8, 101-105.
- 65) MARSHALL, D.C. (1958): Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33, 385-396.
- 66) MATSUI, T., and H.EGUCHI (1976): Computer control of plant growth by image processing I. Mathematical representation of relation between

- growth and pattern area taken in photographs of plants. *Environ. Control in Biol.*, 14, 1-7.
- 67) McBURNEY, T. and P.A. COSTIGAN (1987): Plant water potential measured continuously in the field. *Plant and Soil*, 97, 145-149.
- 68) McCAIG, T.N. (1986): A microcomputer-controlled leaf-weighing system. *Agron. J.*, 78, 551-557.
- 69) MILLER, W.B. and R.W. LANGHANS (1985): Growth and productivity of 'Grand Rapids' lettuce in diurnally fluctuating temperatures and day/night average temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 110, 560-565.
- 70) 三輪敬之・櫛橋康博・町田浩章 (1987) : カボック葉表面における生体電位変化について. *生物環境調節*, 25, 123-125.
- 71) Mortensen L.M (1986): Effect of relative humidity on growth and flowering of some greenhouse plants. *Scientia Hort.*, 29, 301-307.
- 72) 長岡正昭・高橋和彦・新井和夫 (1984) : トマト・キュウリの光合成・蒸散に及ぼす環境条件の影響. *野菜試報 A.*, 12, 97-117.
- 73) 長野敏英・島地英夫 (1976) : 植物の水分状態とその制御に関する研究 (1) 水分状態の測定について. *農業気象*, 32, 67-71.
- 74) 中島武彦・大野 元 (1985) : レタスの生育に及ぼす明期間欠補光の影響. *昭60春園学要旨*, 238-239.
- 75) NAMKEN, L.M., J.F. BARTHOLIC, and J.R. RUNKLES (1969): Monitoring cotton plant stem radius as indication of water stress. *Agron. J.*, 61, 891-893.
- 76) 小田雅行・野中正義・星野和生 (1985) : タイプを異にしたレタスの光合成速度. *野菜試栽培部研究年報*, 12, 67-78.
- 77) 小田雅行・野中正義・星野和生 (1987) : レタスの投影面積と生長の関係. *農気東海誌*, 45, 6-12.
- 78) 岡部勝美 (1985) : 野菜の補光栽培に関する研究 (第1報) サラダナの生育に及ぼす夜間補光の影響. *昭60秋園学要旨*, 288-289.
- 79) 大政謙次・橋本 康・相賀一郎 (1981) : 汚染ガスに被曝した植物の葉温パターンの計測. (II) 種々の汚染ガスによる葉の可視症状の出現に寄与する

主な要因について。国立公害研報, 28, 133-148.

- 80) OMASA, K., M. ONOE, and H. YAMADA (1985): NMR imaging for measuring root system and soil water content. *Environ. Control in Biol.*, 23, 99-102.
- 81) OMASA, K., K. SHIMAZAKI, I. AIGA, W. LARCHER, and M. ONOE (1987): Image analysis of chlorophyll fluorescence transients for diagnosing the photosynthetic system of attached leaves. *Plant Physiol.*, 84, 748-752.
- 82) RASCHKE, K. and A. RESEMANN (1986): The midday depression of CO₂ assimilation in leaves of *Arbutus unedo* L.: diurnal changes in photosynthetic capacity related to changes in temperature and humidity. *Planta*, 168, 546-558.
- 83) 桜谷哲雄 (1982) : 作物体内の蒸散流量測定法の開発と応用. 農技研報 A, 29, 47-121.
- 84) SCHAEFER, N. L., E. S. TRICKETT, A. CERESA, and H. D. BARRS (1986): Continuous monitoring of plant water potential. *Plant Physiol.*, 81, 45-49.
- 85) SCHREIBER, U., W. WIDAVER, V. C. RUNECKLES and P. ROSEN (1978): Chlorophyll fluorescence assay for ozone injury in intact plants. *Plant Physiol.*, 61, 80-84.
- 86) 関山哲雄・羽生広道・岡部勝美 (1982) : 環境ストレスに対する植物生体反応の連続測定法の開発. 電中研報, 481016, 1-31.
- 87) 関山哲雄・岡部勝美・岩尾憲三・藤野安朗 (1978) : 植物生体情報の工学的計測と処理に関する研究 (第1報) 茎の膨縮, 伸長および葉身の電気特性などの連続測定法と測定事例. 電中研報, 478005, 2-9.
- 88) 関山哲雄・岡部勝美・羽生広道・岩尾憲三・藤野安朗・野口和揮 (1980) : 植物生体情報の工学的計測と処理に関する研究 (第2報) 茎の膨縮特性ならびに葉身の電気特性と葉温振動. 電中研報, 479011, 2-10.
- 89) SHACKEL, K. A. and E. BRINCKMANN (1985): In situ measurement of epidermal cell turgor, leaf water potential, and gas exchange in

- Tradescantia virginiana* L.. Plant Physiol.,78, 66-70.
- 90) SHIBAYAMA,M. and K.MUNAKATA (1986a): A spectroradiometer for field use II. Biomass estimates for paddy rice using 1,100 and 1,200 nm reflectance. Japan.Jour.Crop Sci.,55, 28-34.
 - 91) SHIBAYAMA,M. and K.MUNAKATA (1986b): A spectroradiometer for field use III. A comparison of some vegetation indices for predicting luxuriant paddy rice biomass. Japan. Jour. Crop Sci.,55, 47-52.
 - 92) SHIBAYAMA,M. and K.MUNAKATA (1986c): A spectroradiometer for field use IV. Radiometric prediction on grain yields for ripening rice plants. Japan. Jour. Crop Sci.,55, 53-59.
 - 93) SHIBAYAMA,M., T.AKIYAMA and K.MUNAKATA (1986): A spectroradiometer for field use V. A portable spectrophotometer-design and performance. Japan. Jour. Crop Sci.,55, 427-432.
 - 94) SHIBAYAMA,M. and T.AKIYAMA (1986a): A spectroradiometer for field use VI. Radiometric estimation for chlorophyll index of rice canopy. Japan.Jour.Crop Sci.,55, 433-438.
 - 95) SHIBAYAMA,M. and T.AKIYAMA (1986b): A spectroradiometer for field use VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies. Japan.Jour.Crop Sci.,55, 439-445.
 - 96) SMILLE,R.M. and S.E.HETHERINGTON (1983): Stress tolerance and stress-induced injury in crop plants measured by chlorophyll fluorescence in vivo. Plant Physiol.,72, 1043-1050.
 - 97) STODDART J.L. and E.J.LLOYD (1986): Modification by gibberellin of growth-temperature relationship in mutant and normal genotypes of several cereals. Planta, 167, 364-368.
 - 98) STODDART,J.L., THOMAS H. and E.J.LLOYD (1986): The use of a temperature-profiled position transducer for the study of low-temperature growth in gramineae. Equipment design and output interpretation. Planta, 167, 359-363.
 - 99) TACHIBANA,S. (1982): Comparison of effects of root temperature on

- the growth and mineral nutrition of Cucumber cultivars Figleaf Gourd. J. Japan Soc. Hort. Sci., 51, 299-308.
- 100) 高橋久幸・山村 修・松田俊夫 (1987) : タバコの生育・成熟条件と生体情報の変化 第1報 生体情報計測システムの概要とその計測例. 生物環境調節, 25, 41-46.
- 101) 高辻正樹・鶴岡 久・金子忠男 (1978) : 重量の非破壊測定. 化学の実験 29, 302-306.
- 102) 高辻正基 (1982) : 植物工場の基礎知識と実際. 技術情報センター. 大阪.
- 103) 玉木浩二 (1983) : 片持はりセンサを用いた植物重量生長計測. 生物環境調節, 21, 27-35.
- 104) 玉木浩二 (1984) : 載荷板による群落状態植物の重量生長計測. 生物環境調節, 22, 15-21.
- 105) 玉木浩二 (1986) : 水耕栽培したシュンギクの重量生長計測. 生物環境調節, 24, 87-93.
- 106) TANIMOTO, E. and J. WATANABE (1986): Automated recording of lettuce root elongation as affected by auxin and pH in a new rhizometer with minimum mechanical contact to roots. Plant Cell Physiol., 27, 1475-1487.
- 107) TIBBITTS, T.W. and G. BOTTENBERG (1976): Growth of lettuce under controlled humidity levels. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 101, 70-73.
- 108) TIBBITTS, T.W., D.C. MORGAN and I.J. WARRINGTON (1983): Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide, and tungsten halogen lamps at equal PPFD. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 108, 622-630.
- 109) WURR, D.C.E., J.R. FELLOWS, and P. HADLEY (1986): The influence of supplementary lighting and mechanically-induced stress during plant raising, on transplant and maturity characteristics of crisp lettuce. J. Hort. Sci., 61, 325-330.
- 110) 山崎肯哉 (1982) : 養液栽培全編, p51. 博友社. 東京.
- 111) 易 佑林・丹羽谷太・橋本 康 (1987) : パルス光によるサラダナ光合成速

Next, a device for measuring hydroponics seed germination was developed for monitoring the seed weight changes in the process. This device provided measurements that allowed the seed resistance to the environment. The output voltage of the seed cell was most stable when

Studies on monitoring the fresh weight of leaf lettuce

1988

Masayuki ODA

Summary

This research was carried out to determine the growth response of leaf lettuce to the environment through a new method that monitors fresh weight.

Chapter 1. Development of a device for monitoring fresh weight

First, the optimum conditions of a hydroponic solution for the growth of leaf lettuce were studied to determine the specifications required for the monitoring devices. Optimum growth occurred when the solution's concentration equaled 1.5 to 2.0 times the standard solution shown in Table 1, at a pH of about 6 and a temperature of 25 °C. Dissolving oxygen over 7.3 ppm was required for the optimum growth. This dissolution was accomplished by supplying air over 2.5 l min^{-1} into the nutrient solution (42 l).

Next, a device composed of hydroponics and load cells was developed for monitoring the fresh weight changes in the lettuce. This device provided measurements that clarified the growth response to the environment. The output voltage of the load cell was most stable when

the load cell was excited by a stabilized electrical power unit. Temperature's effect and hysteresis on the load were negligible. Output from the monitoring device positively correlated to fresh weight over the surface of the solution, so that the value was about 1 % larger than that of top fresh weight.

Last, The monitoring device was improved to keep the surface level of the solution and the solution's temperature constant. With this device, the concentration of dissolving oxygen was kept over 7.3 ppm.

Chapter 2. Evaluation of the monitoring device through long-term monitoring of fresh weight in leaf lettuce

Fresh weight of leaf lettuce was monitored by using the device developed in chapter 1.

The fresh weight decreased just after the planting to the hydroponic. The fresh weight started to increase 0.5, 1 and 2 days after the planting, respectively at 30, 20 and 10 °C of solution temperature, at the air temperature of 20 °C, at the relative humidity of $90 \pm 5\%$ and at the photon flux density of $240 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. At the solution temperature of 20 °C, white and smooth roots were generated within two days after the planting. Then, the top/root ratio of fresh weight started to decrease, and oxygen absorption rate and TTC reduction activity of the root stopped to increase.

The weight changes were monitored until harvesting time. Then, the growth rate was calculated. Next, the growth and development of the plants were analyzed. The weight increased from 4.4 g to 101 g in 17 days. The minimum and maximum rates were found respectively on the fifth and eleventh day after the measuring. The minimum growth rate corresponded with some wilting and a decrease in the transpiration rate. The decline in the growth rate after eleventh day, was caused by mutual excessive shading of leaves.

The growth rate of top fresh weight and the respiration rate began to decrease 12 hours after dark, while the height/width of the plant profile, as an indicator of succulent growth, began to increase 2 days after darkness. The increment of the top fresh weight within first 12 h darkness increased depending on the previous light intensity.

Consequently, it is clear that fresh weight can be monitored in light and darkness with the device developed for long-term monitoring and that the growth rate of fresh weight is useful as an indicator of growth. Furthermore, the relationship between fresh weight and the other growth parameters become clear.

Chapter 3. Fluctuation of fresh weight of leaf lettuce by the change of ambient conditions

The temporary fluctuation in fresh weight, which was supposed to be

induced with the changes of ambient conditions, was investigated, and a correct method for monitoring fresh weight was studied.

Fresh weight temporally decreased after : (1)intensifying the light, (2)rising the temperature at constant relative-humidity, (3)dropping the humidity levels, and (4)increasing wind velocity. The fresh weight increased under the opposite conditions. The fluctuations in the weight stabilized 30 minutes after the environmental changes. In the change of light condition from light to dark, transpiration rate and the water saturation deficit(WSD) of the leaf increased. Fresh weight during the temperature rise decreased under a constant relative humidity, but was stable under a constant vapor pressure deficit(VPD).

Chapter 4. Analysis of growth responses to air temperature and light intensity with the application of monitoring fresh weight in leaf lettuce

Rapid determination of the optimum environment for the growth of leaf lettuce was made. Growth rates of the fresh weight were determined with stepwise control at several temperature in every sequent 12-h interval. The growth rates at each temperature were correctly measured by omitting data for the first one hour after the change of temperatures under a constant relative humidity. Furthermore, the fluctuation of the fresh weight during the change of temperature was eliminated in a

constant VPD.

Effects of temperature and light intensity on the growth rate of fresh weight were clarified with this method. The optimum temperature for the growth rate of the top fresh weight and also the photosynthetic rate ranged from 25 to 30 °C. However, the light saturation point(LSP) of 400 $\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for the growth rate was lower than that of 1300 $\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for the photosynthetic rate. This suggested that high light intensity induced water stress in the plant and depressed the growth.

The actual method for reducing water stress was studied with the treatment of vaporization and shading. The growth was promoted mainly by vaporization and some by shading. Under high humidity, however, the growth was not promoted with shading. This shading decreased the dry matter rate of leaves, increased leaf area and SLA through the elongation of leaves.

Consequently, the method for monitoring the fresh weight was established. It is clear that fresh weight is also a superior indicator for monitoring the growth of leaf vegetables. Moreover, the growth under an intensive light is promoted especially by vaporization through eliminating water stress.